



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Liina Tait

**PUIDUTOLMU LEVIKU TÕKESTAMINE
UDUVIHMUTUSE ABIL**

WOODEN DUST SUPPRESSION BY MIST IRRIGATION

Magistritöö

Vesiehitus ja veekaitse õppekava

Juhendaja: professor Mait Kriipsalu, *PhD*

Tartu 2017



Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Liina Tait		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Puidutolmu leviku tõkestamine uduvihmutuse abil			
Lehekülgi: 63	Jooniseid: 28	Tabeleid: 10	Lisasid: 0
Osakond: Veemajandus			
Uurimisvaldkond: Hüdraulika ja hüdroloogia			
Juhendaja: Prof. Mait Kriipsalu			
Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2017			
<p>Tolmu tekib paljudes tööstusharudes, näiteks paberi- ja puidutööstuses. Inimeste tarbimisharjumuste muutuste ja elanikkonna kasvu tõttu suureneb aasta-aastalt inimeste poolt tekitatud jäätmemahut üle maailma. Seetõttu näeb Eesti jäätmekava 2014-2020 ette suuremat rolli jäätmete taaskasutamisel: aastal 2011 oli olmejäätmete ringlussevõtu osakaal olmejäätmete kogumassist 27% ning aastaks 2020 peab see olema 50%. Jäätmete taaskasutamisel tuleb jäätmed esmalt sorteerida, purustada, hakkida või muul viisil töödelda. Iga töötlemismeetodiga võib kaasneda suurtes kogustes tolmu. Seetõttu on ettevõtetes väga oluline teada konkreetse tolmu iseloomu, selle mõjusid keskkonnale ja tervisele ning võimalikke tolmutõrjemeetodeid.</p> <p>Käesolevas magistritöös antakse kirjanduse baasil ülevaade õhus lendlevast tolmust, selle mõjust inimestele ja seadmetele ning taaskasutamise juures tekkinud tolmu levikut tõkestavatest meetoditest. Antud töö praktiline eesmärk oli katsetada uduvihmutuse efektiivsust puidutolmu leviku tõkestamisel siseruumides. Selleks ehitati EMÜ veemajanduse osakonda katsestend ning viidi läbi katsed. Katsetes kasutati puidu lihvimisel tekkinud tolmu, mille keskmine suurus oli 29 mikromeetrit. Võrreldi kahte olukorda: ühte olukorda, kus tolmu lendleb katsestendis ventilaatori poolt tekitatud tuule mõjul ja düüside rivi ei tööta, ning teist olukorda, kus düüside rivi töötab. Tulemustest selgus, et antud uduvihmutusseadmega on võimalik tolmu levikut tõkestada. Puidutolmu tõrjumisel saadud tulemusi saab laiendada jäätmete töötlemisel tekkivale suureneva mahuga tolmu.</p>			
Märksõnad: Lenduv tolmu; tolmu mahasurumine; veepihusti; düüsid; õhuvool			



Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Liina Taits		Speciality: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Wooden dust suppression by mist irrigation			
Pages: 63	Figures: 28	Tables: 10	Appendixes: 0
Department: Water Management Field of research: Hydraulics and hydrology Supervisor: Prof. Mait Kriipsalu Place and date: Tartu, 2017			
<p>The dust is generated in many industries, such as paper and wood industries. The overall amount of the wastes produced by the humans is increasing every year because of the increase of the human population and the consumer habits. That is why Estonian national waste management plan for 2014-2020 intends to increase the role of recycling: in 2011, the proportion of household waste for recycling municipal waste by weight was 27% but by 2020 it should be 50%. In order to recycle, the waste must first be sorted, crushed, shredded or otherwise processed. Each processing method may cause dust. Therefore, it is very important in industries to know the characteristics of the dust, its impacts on the environment and health and also the control and suppression methods of the dust.</p> <p>In this Master's Thesis an overview of air pollution, dust particles, their effects on humans/gear and dust suppression equipments is given. The aim of the thesis was to test the effectiveness of the nozzle line system in wooden dust suppression indoors. For that, the test stand was built in the Department of Water Management of Estonian University of Life Sciences and experiments conducted. Wooden dust was taken as an object for research. Two situations were compared: one in which the dust is flying in the test stand with the help of the wind generated by the fan and the nozzle line system was not working, and the other, where the nozzle line system was working. As a result, it was found that it is possible to suppress wooden dust distribution with our designed nozzle line system. These results can also be applied on other types of dust generated in waste management companies more and more every year.</p>			
Keywords: Fugitive dust; dust suppression; water spary; nozzles; air flow			

SISUKORD

SISUKORD	4
SISSEJUHATUS	6
1. ÕHU JA ÕHUSAASTE ÜLDISELOOMUSTUS.....	8
1.1 Õhu saasteainete teke ja allikad	8
1.2 Õhusaaste levik	10
1.3 Välisõhusaaste mõõtmine	11
1.4 Siseruumide õhk	12
1.5 Siseruumide õhusaaste mõõtmine.....	12
1.6 Õhusaaste mõju.....	12
1.6.1 Õhusaaste mõju inimesele	12
1.6.2 Õhusaaste mõju materjalidele ja seadmetele.....	16
2. JÄÄTMETE ÜLDISELOOMUSTUS	18
2.1 Jäätmekäitluse areng	18
2.2 Tolm jäätmekäitluses	20
3. VIHMITID TOLMUTÕRJES	23
3.1 Peamised tolmutõrjemeetodid siseruumides.....	23
3.2 Vihmutusest ja sadenemisest	24
3.3 Eri vihmutusviisid tolmu tõkestamisel	26
4. LABORKATSED	31
4.1 Eesmärk ja hüpotees	31
4.2 Katse materjal ja meetoodika.....	31
4.2.1 Katseskeem.....	31
4.2.2 Uduvihmutuse süsteem	34
4.2.3 Katsetes kasutatav tolmu	36
4.2.4 Mõõteriistad ja -metoodika	38
4.2.5 Tuulekatsed	40
4.2.6 Tolmukatsed	41
4.2.7 Katsed tuule ja veega.....	41
4.2.8 Katsed tolmu, tuule ja veega	42

4.4 Katsete tulemused	43
4.4.1 Tuulekatsed	43
4.4.2 Tolmukatsed	45
4.4.3 Katsed tuule ja veega.....	47
4.4.4 Katsed tolmu, tuule ja veega	50
4.5 Järeldused katsest.....	53
KOKKUVÕTE	56
VIIDATUD ALLIKAD	58
SUMMARY	61

SISSEJUHATUS

Tolmu all käsitletakse õhus lendlevaid või pinnale langenud osakesi, mille läbimõõt on 10 kuni 50 mikromeetrit (Business Dictionary, 2017). Tolmu tekib kõigis tööstusettevõtetes, peamiselt paberi- ja puidutööstuses, kuid üha rohkem on täheldada seda, et tolmu tekib ka jäätmete töötlemise ja taaskasutamise käigus. Jäätmete taaskasutamine on valdkond, mille arengut soodustavad arengukavad (EL Ringmajandus, 2015; Riigi jäätmekava, 2017) ja õigusaktid (Jäätmeseadus, 2004; Jäätmehoolduseeskiri, 2013). Tolm tekib mitmesuguste materjalide lõikamise, purustamise, lõhkamise, lihvimise, puurimise, saagimise ja muude taoliste toimingute käigus. Kuna jäätmete töötlemine leiab üha sagedamini aset katuse all, siis tuul tolmu ei hajuta ning tolmuuga tuleb võidelda siseruumides.

Igal aastal kogutakse Euroopa Liidu liikmesriikides kokku ligikaudu 2500 miljonit tonni jäätmeid (Waste statistics, 2016). Eestis tekkis 2014. aastal jäätmeid 21,8 miljonit tonni (Waste statistics, 2016). Enamuse tekkinud jäätmetest moodustasid põlevkivi kasutamisega seotud jäätmed, kuid olme-, ehitus- ja lammutusjäätmed moodustasid jäätmete kogutoodangust umbes 1,5 miljonit tonni ehk märkimismäärsed 6,7%. 2014. aastal tekkinud ehitus- ja lammutusjäätmetest 36% moodustas pinnas, 20% isolatsioonimaterjalid, 25% betoon, tellised, plaadid ja keraamikatooted, 11% puit, klaas ja plast ning ülejäänud 8% moodustas muu ehitus- ja lammutuspraht ning neist taaskasutati 81% (Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüs, 2015).

Riigi jäätmekava 2014-2020 peaesmärk on jäätmekäitluse hierarhiat järgiv säästev jäätmehooldus (Riigi jäätmekava, 2014). I strateegiline eesmärk on vältida ja vähendada jäätmeteket, sealhulgas vähendada jäätmete ohtlikkust, II strateegiline eesmärk on võtta jäätmed ringlusse või neid muul viisil taaskasutada maksimaalsel tasemel ja III strateegiline eesmärk on vähendada jäätmetest tulenevat keskkonnariski, tõhustades muuhulgas seiret ning järelevalvet (Riigi jäätmekava, 2014). Käesolev töö keskendub II strateegilisele eesmärgile, sest jäätmetega seotud toimingud saastavad õhku ning taaskasutamiseks jäätmete ettevalmistamine võib inimeste tervist olulisel määral kahjustada. Ehkki õhusaaste tervise mõjud ei ulatu Eestis veel raskeima olukorraga Euroopa riikide tasemeni, on see

täiesti võrreldav Euroopa keskmisega (Orru jt., 2010). Seega on ka Eestis üha enam vajalik konkreetsete poliitiliste ja praktiliste meetmete rakendamine õhusaastest tingitud haigestumiste ja surmajuhtude vähendamiseks ning rahva tervise tõhusamaks kaitseks (Orru jt., 2010). Käesolevas magistritöös tõstatatakse tolmu tõrjumise teema jäätmekäitluses, kuid praktilistel põhjustel tehakse katsed puidutolmuga. Puidutolm osutus valituks, sest katsetes kasutatav tolmu peab katse läbiviijate tervise seisukohast olema võimalikult inimsõbralik ning teisalt imiteerib piisavalt hästi ühte tüüpi jäätmekäitluses tekkivat tolmu. Töö on tehtud eeldusel, et saadud tulemusi saab kasutada nii puidu- kui jäätmetolmu maha surumisel.

Magistritöö eesmärgiks on:

- anda ülevaade õhusaaste mõjust inimestele ja seadmetele ning taaskasutamise juures tekkinud tolmu levikut tõkestavatest meetoditest;
- katsetada laboritingimustes tolmu levikut tõkestavat uduvihmutussüsteemi;
- anda katse tulemuste põhjal soovitusi tolmutõrjeks Eesti jäätmekäitlusjaamades ja puidutööstuses.

Esimesed kolm peatükki on kirjandusülevaate saamiseks ja tolmu probleemi teadvustamiseks. Neljandas peatükis tuuakse välja laborkatsete metoodika, tulemused ja järeldused. Magistritöö hüpotees on, et uduvihmutuse abil on võimalik vähendada tolmu hulka õhus.

Autor tänab juhendajat Mait Kriipsalu heade nõuannete eest töö valmimisel, samuti tänusõnad Toomas Tammele, Linnar Pärnale, Morten Poolakesele, Kristiina Taitsile, Joosep Järvpõllule ja teistele, kes töö valmimisel abiks olid.

1. ÕHU JA ÕHUSAASTE ÜLDISELOOMUSTUS

1.1 Õhu saasteainete teke ja allikad

Maailma üha suureneva rahvaarvu üheks negatiivseks tagajärjeks on keskkonna saastamine, sealhulgas õhusaaste. Õhusaastega puutub kokku nii õues kui siseruumides, eriti aga töökodades ja tootmispaikades. Saastamine on mis tahes tahke, vedela või gaasilise aine, energia (soojus-, heli- või radioaktiivse energia) või mikroobide sattumine keskkonda (õhku, vette või mulda), toiduaineisse või organismidesse hulgal, mis ületab nende pikaajalise keskmise loodusliku sisalduse (Masing, 1992). Saasteainete koguste kasvu vähendamiseks ja vajalike abinõude rakendamiseks formuleeriti Genfis 1979. aastal Piiriülese õhusaaste kauglevi konventsioon (Piire ületav õhusaaste, 2004). Genfi konventsioon jõustus 1983. aastal. Eesti ühines sellega 2000. aastal (Piire ületav õhusaaste, 2004).

Siseõhu kõrvalisteks osakesteks võivad olla tolm, mikroorganismid ning tööstusettevõtete ja transpordivahendite eraldatavad gaasid (Angelstok, 2006). Käesolev magistritöö keskendub tolmu leviku tõkestamisele siseruumides uduvihmutuse abil.

Õhu koostise muutused toovad endaga kaasa palju keskkonnaprobleeme, nagu näiteks terviseprobleemid, mõjud ökosüsteemidele ning mõjud materjalidele, millele tolm laskub. Õhu koostise muutuse peamiseks tekitajateks on saasteained. Saasteaineks ehk reoaineks nimetatakse soovimatut tahket, vedelat või gaasilist ainet vees, õhus, mullas või toiduaineis (Masing, 1992). Saasteained võib jagada primaarseteks ja sekundaarseteks. Esmased saasteained on näiteks pinnasetolm ja vingugaas auto heitgaasidest (Orru, 2007). Sekundaarsed saasteaineid emiteeritakse kaudselt: need tekivad siis, kui primaarsed ained reageerivad või seonduvad omavahel (Orru, 2007). Üheks näiteks sekundaarsete saasteainete puhul on maapinna lähedane osoon, mis eraldub fotokeemilise sudu tekkeprotsessis. Õhus leiduvate saasteainete koguseid vähendada on raske, kui mitte võimatu ning eelkõige peaks keskenduma saasteainete tekkeallikate vältimisele.

Õhusaastel on väga palju allikaid. Üldjuhul jaotatakse õhusaaste allikad inimtekkelisteks ehk antropogeenseteks ja looduslikeks. Antropogeenseteks saasteallikateks peetakse statsionaarseid allikaid, (nt. elektrijaamad, katlamajad ja tööstusettevõtted), mobiilseid allikaid (nt. mootorsõidukid, meresõidukid) ning puidu ja kütuste põletamist ahjudes, kaminates ja kateldes meie igapäevaelus (Orru, 2007). Samuti on inimtekkelised saasteallikad jäätmete ladestamis- ja töötlemispaigad, sest jäätmete töötlemine tolmab ning ka tavaline ladestamine on saasteallikas: jäätmete ladestamisel eraldub õhku kogu polüklooritud dibenso-p-dioksiinide (PCDD) kogusest umbes 17% (Eesti paiksetest ja liikuvatest saasteallikatest välisõhku eralduvate saasteainete summaarsete heitkoguste vähendamise riiklik programm aastateks 2006-2015). Looduslikeks allikateks on näiteks pinnasetolm linnatänavatelt või väheste taimestikuga aladelt, suits ja süsinikoksiidid metsa- ja rabatulekahjust, metaan ja süsihappegaas erinevatest looduslikest protsessidest (Orru, 2007).

Nii inimtekkelised kui ka looduslikud õhusaasteallikad saab jagada punktallikateks ja hajusallikateks. Punktallikad on näiteks korstnad, ventilatsioonivad, mahutite tuulutavad ja muud teadaoleva läbimõõduga avad, millest on võimalik mõõta saasteainete väljumiskiiruse ja kontsentratsiooni kaudu heitkoguseid. Hajusallikad on erinevad pind- ja joonsaasteallikad, näiteks aeratsiooni-basseinid, mudaväljakud, sõnnikuhoidlad, autoteed ja muud rajatised, mille puhul ei ole võimalik tavapäraste vahenditega määrata saasteainete väljumiskiirust ega kontsentratsiooni ning seetõttu ka hetkelisi heitkoguseid (Kaasik jt., 2015).

Looduslikud saastajad võivad tekitada küll tõsiseid ebameeldivusi, kuid nende mõju õhu üldisele koostisele ja saastatusele, võrreldes inimtegevusega seotud tööstuslike allikatega, on küllaltki väike (Piire ületav õhusaaste, 2004). Eesti suuremate linnade peamiseks õhusaasteallikateks on liiklus (sõidua autod, veokid, bussid jm), olmekütmine (eeskätt ahiküte puuküttega piirkondades), suured keskkütte katlamajad, erinevad tööstusettevõtted ja tänavatolm (Orru jt., 2010). Lisaks kohapeal tekkinud saastele lisandub teistest piirkondadest ja riikidest tulev õhusaaste, mis võib õhumassidega kohale kanduda tuhandete kilomeetrite kauguselt (Orru jt., 2010).

1.2 Õhusaaste levik

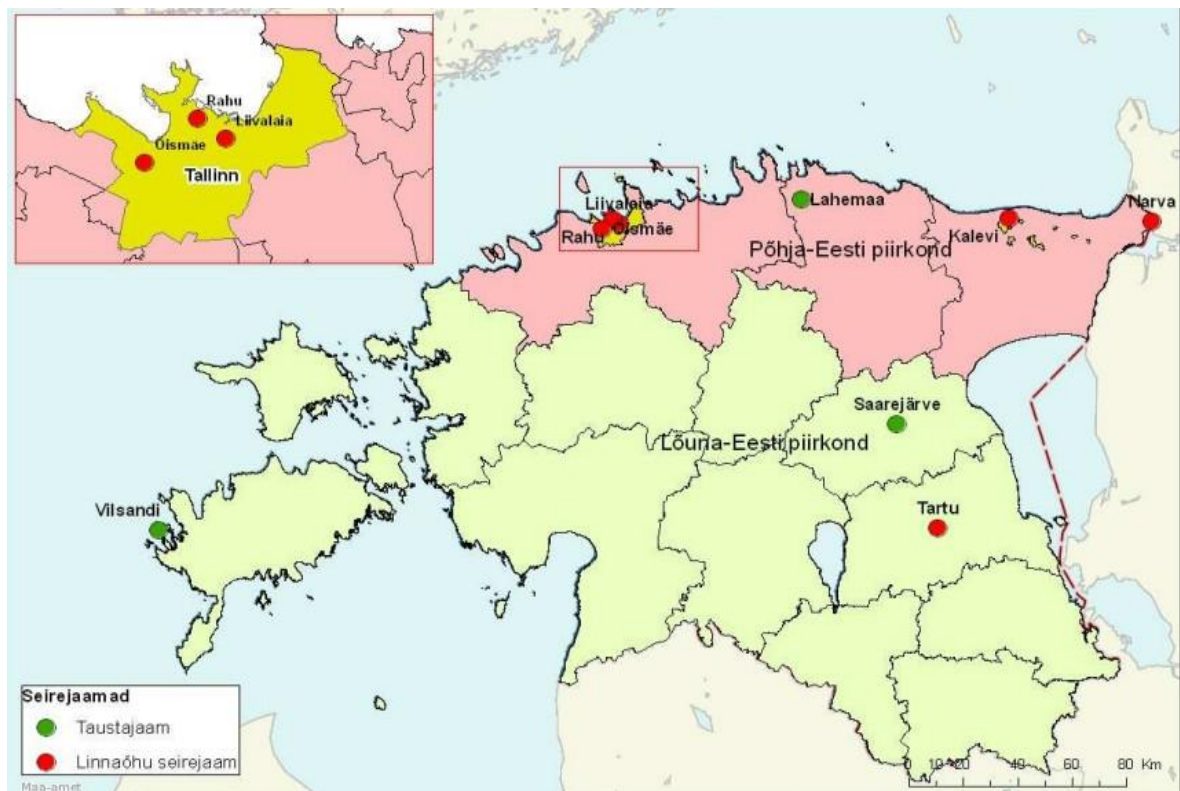
Lisandite edasikanne õhus on füüsikaline protsess, millesse põimuvad keemilised muundumised õhus. Õhu lisandite (aga ka temperatuuri jm õhu omaduste) levikut koos õhumassiga nimetatakse adveksiooniks, mis on kõige kiirem õhusaaste leviku viis. Maapinna lähedal on tuule kiirus harilikult mõnest meetrist sekundis kuni 20 – 30 m/s. Troposfääri ülaosas, 5 – 10 km kõrgusel, ulatub tuule kiirus sageli 50 m/s, üksikjuhtudel kuni 110 m/s. Sellepärast levivad tõusvate õhuvooludega või turbulentsse hajumisega kõrgemale kantud lisandid kiiremini kui maalähedases kihis. Just selle tõttu ei ole hea mõte tööstusettevõtte tolmu lihtsalt atmosfääri heita vaid peaks seda tekkepaigas maha suruma. Ajapikku satuvad saasteained kõrgematest õhukihtidest maapinnale tagasi, näiteks sademete või laskuvate õhuvooludega, mistõttu õhusaaste kauglevi toimub kiiremini, kui meteojaamades mõõdetud tuulte järgi arvata võiks. (Kaasik jt., 2015)

Kui leviku kaugus on võrreldav madal- ja kõrgrõhkkondade mõõtmatega, siis tuleb arvestada, et õhuosakeste trajektoorid ei ole sirged – tuule suund ja kiirus eri ruumipunktides on erinev (Kaasik jt., 2015). Eristatakse voolujoonte koondumist ehk konvergentsi ning lahknemist ehk divergentsi. Voolujoonte koondumine tähendab, et tuule kiirus selles piirkonnas suureneb ning voolujoonte lahknemise korral kiirus väheneb. Üldjuhul on tuulel lisaks horisontaalsetele komponentidele ka vertikaalne komponent, mis tuleneb tõusvatest ja laskuvatest õhuvooludest vastavalt madal- ja kõrgrõhkkondades (Kaasik jt., 2015). Ühtlasi esineb atmosfääris ka tuulekeeriseid, mille mõõtmed võivad olla erinevad. Keeriselisest liikumist gaasis või vedelikus nimetatakse turbulentsiks (Kaasik jt., 2015). Turbulents võib atmosfääris tekkida kahel viisil: õhu voolamisel üle aluspinna konaruste (mehhaaniline turbulents) ja õhu konvektiivsest liikumisest soojenenud aluspinna kohal (soojuslik ehk termiline turbulents) (Kaasik jt., 2015).

Tuuled võivad saasteained kanda nende tekkekohast väga kaugele ka siis, kui nende püsivusaeg atmosfääris on vaid 1 – 3 päeva (SO_2 , NO_2). Maa poolkera piires suudavad ühendid levida kuu ajaga, kuid põhjapoolkeralt lõunapoolkerale ja vastupidi liikumiseks peab aine õhus püsima vähemalt 6 – 12 kuud (Piire ületav õhusaaste, 2004).

1.3 Välisõhusaaste mõõtmine

Peamisteks õhusaaste mõõtmise meetoditeks on õhuseire, mis võib olla pidev, pisteline, automaatne või manuaalne. Õhuseire abil hoitakse silm peal õhusaaste tasemetel ning võrreldakse saadud tulemusi piirväärtustega. Ühtlasi hinnatakse õhusaaste ohtlikkust tervisele (Keis, 2010). Eestis on üheksa riiklikku seirejaama, millest kuus on linnaõhu ja kolm taustajaamad (joonis 1) (Parts, 2013). Kuna õhukvaliteedi pidevmõõtmisi on kallid teha, siis kasutatakse õhukvaliteedi mõõtmiseks enamjaolt pistelisi mõõtmisi.



Joonis 1. Eesti välisõhu mõõtepunktid Eestis (Maasikmets jt., 2013)

Peale saasteainete mõõtmise määratakse aineringluses ära ka oluliste ainete sadenemine. Sadenemine jaotub kaheks: märgsadenemiseks ja kuivsadenemiseks. Märgsadenemiseks nimetatakse sadenemist, kus saasteainete hulk on sõltuvuses vihma hulga ning vastuvõtja asukohaga ning kuivsadenemine on olukord, kus saasteainete kontsentratsioone määratakse automaatsete analüsaatoritega (Keis, 2010).

1.4 Siseruumide õhk

Siseruumides tekib erinevatele pindadele, eriti horisontaalse nurga all olevatele, õhus lendlevate osakeste tõttu kergesti tolmu kiht. Sellise tolmu osakeste suurus on 0,36 kuni 0,41 mikromeetrit (Gorka-Kostrubiec jt., 2014). Enamus siseruumis leiduvast tolmust on tekkinud erinevate materjalide põletamisel või lennelnud siseruumidesse tänavalt, näiteks tänavatolm (Gorka-Kostrubiec jt., 2014).

1.5 Siseruumide õhusaaste mõõtmine

Siseõhu mõõtmisi teostatakse selleks, et määrata majas leiduvaid riskipiirkondi ja hinnata, kas inimeste sekkumine tasus end ära või mitte (nt. ventilatsioonisüsteem). Ühtlasi uuritakse siseõhu mõju inimeste tervisele. Siseõhu mõõtmisi teostatakse näiteks söögitegemise ajal, hommikul ja õhtul, 24 tunni vältel, 48 tunni vältel või umbes seitsme päeva vältel. Lihtsamad asjad, mida siseruumides mõõta saab on ventilatsioonisüsteemi tõhususe mõõtmine ja siseõhu koostise mõõtmised. Koostisest mõõdetakse enam-jaolt vingugaasi, lämmastikoksiidide ja erinevate aldehüüdide sisaldust siseõhus. Mõõtmisi saab teostada erinevate värvi muutvate difusiooni torudega ja elektrokeemiliste sensoritega. Süsinikmonooksiidi saab mõõta näiteks ka inimese hingeõhu ja vere kaudu. (Naumoff, 2005)

1.6 Õhusaaste mõju

1.6.1 Õhusaaste mõju inimesele

Eestis on küll sätestatud välisõhu saastatuse taseme piir- ja sihtväärtused, saasteaine sisalduse piirnormid ning nende saavutamise tähtajad, kuid ka lubatust väiksemad kogused õhusaastet õhus mõjutavad nii inimesi, seadmeid kui ka materjale (Välisõhu saastatuse taseme piir- ja sihtväärtused, 2004). Kõige kergemateks õhusaaste sümptomiteks on ebamugavustunne rinnus, köha ja aevastamine. Tavaliselt inimesed kergete sümptomitega

arsti poole ei pöördunud, kuid selle tagajärjel võib väheneda töövõime ja tekkida raskused keskendumisel, mistõttu kahaneb tööefektiivsus. Päriskultuuris on inimesed sunnitud haiguslehele jääma ning tõsisemate ilmingute puhul vajab osa neist ka haiglaravi.

Eestis on aastal 2010. läbi viidud õhusaastega seotud uuring, kus uuriti välisõhus peenete osakeste poolt põhjustatud varajaste surmade arvu. Uuringust selgus, et välisõhusaaste põhjustab Eestis viies linnas kokku 463 varajast surma aastas (tabel 1). Lisaks varajastele surmadele põhjustavad peened osakesed veel 231 hingamisteede ning 338 südameveresoonkonna haigust, mille tõttu on inimesed sunnitud pöörduma haiglasse (Orru, 2008).

Tabel 1. Varajaste surmade, kaotatud eluaastade ja oodatava eluea vähenemiste arv Tallinna, Tartu, Kohtla-Järve, Narva ja Pärnu linnades ühes aastas (Orru, 2008)

Asukoht	Varajaste surmade arv	Kaotatud eluaastad aastas	Oodatava eluea vähenemine aastates
Tallinn	296	3859	0,64
Tartu	64	838	0,68
Kohtla-Järve	18	257	0,35
Narva	37	534	0,51
Pärnu	47	546	0,95

Tabel 1 tulemused on saadud rahvastiku andmete, suremuse ja haigestumuse, õhusaaste ekspositsiooni ja riskitasemete analüüsimise tulemusena. Kaotatud eluaastade arv on leitud hüpoteetilise oodatava eluea ja tegeliku oodatava eluea võrdlusena. Tulemustest selgus, et Tartu, Kohtla-Järve, Narva ja Pärnu välisõhus leiab aset keskmiselt 166 varajast surma aastas, 2200 kaotatud eluaastat aastas ning keskmine oodatava eluea kaotus elaniku kohta on umbes 8 kuud (Orru, 2008).

Õhusaaste osakesi hingatakse sügavale hindamisteedesse. Koos seotud raskmetallide, orgaaniliste ja muude keemiliste ühenditega põhjustavad osakesed erinevate mehhanismide koostoimel põletikulisi protsesse (tabel 2). (Orru jt., 2010)

Tabel 2. Õhusaaste osakeste jõudmine hingamisteedesse (Kaasik jt., 2015)

Hingamistee	Osakeste suurus (µm)
Nina, kurk	Osakesed < 30
Hingetoru, bronhid, bronhiolid	Osakesed < 10
Pulmonaarsed alveoolid	Osakesed < 2,5
Kopsukude, vereringe	Ultrapeened osakesed < 0,1

Eelkõige avaldab õhusaaste mõju inimese hingamisteedele ja südame-veresoonkonnale ehk kardiovaskulaarsüsteemile. Hingamisteede ülesanne on viia suur kogus õhku kopsudesse (keskmiselt 400 miljonit liitrit elu jooksul), kus hapnik seotakse punastes verelibledes hemoglobiiniga ning seejärel transporditakse organitesse ja kudedesse (Orru, 2007). Eriti vastuvõtlikud õhusaastele on kopsud, sest sinna jõuavad ka kõige väiksemad osakesed. Tundlikku kopsukudet võivad kahjustada õhu saasteained, nagu osoon, peened osakesed, (rask)metallid ning vabad radikaalid. Osoon võib kahjustada eeskätt kopsualveoole ja teisi väiksemaid struktuure kopsus (Orru, 2007).

Hingamissüsteem toob meie kehasse hapnikku ja viib välja süsihappegaasi. Peamine gaasivahetus toimub kopsudes läbi difusioonimembraani. Juhul kui õhusaasteosakesed on piisavalt väikesed, siis transporditakse need otse läbi membraani vereringesse, mis on meie tervisele eriti ohtlik (Orru, 2007). Kõik, mis on meie vereringes, liigub edasi ka meie südamesse.

Õhusaaste võib põhjustada hingamisteede põletikke, kahjustada hingamisteede limaskesta või põhjustada allergiaid ja viiruseid (Kaasik jt., 2015). Mitmesuguste saastekomponentide võimalik mõju inimesele on välja toodud tabelis 3. Lai keemiliste ja bioloogiliste saasteainete spekter võib põhjustada struktuurseid ja funktsionaalseid muutusi. Struktuurne muutus on näiteks südamelihase põletik ning funktsionaalne muutus esineb näiteks südame rütmi muutumises (Orru, 2007).

Tabel 3. Saastekomponentide võimalik mõju (Orru, Merisalu, 2007)

Saasteaine	Esinemisevorm	Bioloogiline mõju
Lämmastikoksiid (NO_x)	Gaasilisena sissehingatavas õhus	Muutused hingamisteede ja kopsu tundlikkuses; suureneb vastuvõtlikkus hingamisteede põletikele
Vääveldioksiid (SO_2)	Gaasilisena sissehingatavas õhus	Tundlikel inimestel hingamisraskused, südame-veresoonkonna ning hingamisteede haiguste ägenemine
Süsinikoksiid (CO)	Gaasilisena sissehingatavas õhus	Väheneb hapniku ülekanne elunditesse ja rakkudesse; töövõime vähenemine
Osoon (O_3)	Gaasilisena sissehingatavas õhus	Kopsufunktsiooni halvenemine, hingamisteede põletikud
Metallid (Cd, Hg, Pb, Ni, V, Cu, Fe)	Seotud peente osakestega	Tekitavad põletikku. Suureneb reaktiivsete hapnikku sisaldavate ainete produktsioon
Orgaanilised komponendid	Seotud peente osakestega	Mõjuvad ärritavalt, võivad põhjustada mutatsioone rakkudes ning soodustada vähktõve arengut
Ioonid: sulfaat, nitraat, H^+	Seotud peente osakestega	Tekkiv hape võib kahjustada hingamisteede limaskesta ja muudab metallioonid liikuvamaks
Bioloogilist päritolu aines - viirused, bakterid jm	Seotud peente osakestega	Põhjustab allergiat; viirused ja bakterid nõrgestavad immuunsüsteemi
Reaktiivsed gaasid	Seotud peente osakestega	Absorbeerituna peentesse osakestesse satuvad alumistesse hingamisteedesse, põhjustades kopsukahjustusi
Karbonaatne materjal	Peente osakeste tuum	Pikaajalise ekspositsiooni korral põhjustab süsinik kopsude ärritust, epiteelrakkude vohamist ja fibroosi

Puidutolm võib esile kutsuda nahahaiguseid või samuti hingamisteede põletikke, nagu näiteks astma ja allergiline nohu, ning ühtlasi võib soodustada vähkkasvajate arengut. Puidutolm võib põhjustada näiteks karvanääpsupõletikku, nõgesetõbi ja ärritust ning allergilist dermatiiti ehk nahapõletikku (Eisen, 2003). Peaaegu igasugune puit võib põhjustada naha ärritust, kui selle tolmu satub kontakti nahaga ning seetõttu peaks tehastes olema väga tähtsal kohal kaitsevahendid, näiteks näokaitsed ja ventilatsioon (Eisen, 2003).

1.6.2 Õhusaaste mõju materjalidele ja seadmetele

Peale inimeste teeb õhusaaste kahju ka materjalidele ja seadmetele. Valdavalt on õhusaaste mõju materjalidele seotud just õhulisandite hapestuvate omadustega ja seepärast räägitakse pigem korrosioonist, kuigi see termin ei hõlma kivimite murenemist ja lagunemist (Kaasik jt., 2015). Väga hästi on õhusaaste mõju materjalidele märgata linnaruumis vasest mälestusmärkidel, kus neil on lisaks vase oksüdeerumisel tekkivale rohelisele vaskoksiidile märgata pruunikaid või muidu tumedamaid laike, mis peegeldavad õhu kaudu sadenenud ühendite ja materjalide reaktsioonil tekkivaid ühendeid (Kaasik jt., 2015). Ka puit ja kivi laguneb õhusaaste mõjul kiiremini (Kaasik jt., 2015).

Kuna tolm võib ka süttida ja plahvatada, siis standard EVS-EN 60079-10-2:2015 käsitleb plahvatusohtlike tolmukeskkondade ning põlevtolmu kihte sisaldavate piirkondade tuvastamist ja liigitamist, et nendes piirkondades süüteallikad õigesti kindlaks teha (Eesti standard, 2015). Tolmuplahvatuses nimetatakse tolmpilve süttimist, sest tolmuosakesed on piisavalt väiksed, et väga kiirel kiirusel süttida ja ära põleda (Eckhoff, 2003). Rohkem kui 70% tööstuses tekkinud tolmust on põlev, mistõttu seadmed, mis tööstuses tekkinud tolmu kokku puutuvad, on alati plahvatustele (Dust explosions, 2017). Paljud ained ei ole tuleohtlikud tavalistes tingimustes, kuid segunedes õhuga muutuvad plahvatusohtlikeks, kui osakeste mõõtmed on väiksed või süttimisenergia muutub piisavalt suureks, nagu näiteks aerosoolidel (Randmaa, 2017). Aerosool on gaas, milles hõljuvad tahke või vedela aine osakesed (Masing, 1992). Tolmud on üsna kergesti süttivad, sest need moodustavad pistleeke, mille surve ja kõrge temperatuur võivad esile kutsuda tolmu plahvatusliku põlemise, kui õhuseoses on piisavalt palju väikseid osakesi. Tüüpiliselt süttivateks tolmuks on looduslikest ainetest ja materjalidest puit, paber, süsi, puuvill, jahu, suhkur, tee, maitseained, sünteetilisest ainetest värvained, plastmassid ja peaaegu kõik orgaanilised ühendid ning anorgaanilistest oksüdeeruvatest ainetest näiteks alumiinium ja magneesium. 09.05.2017 puhkes Tallinnas jäätmejaamas tulekahju, kus süttis põlema transpordiliinidel alumiiniumpulber (Olup, 2017). Sel korral õnnestus päästjatel põleng küll kustutada, kuid iga tulekahju on eluohtlik ning nende tekkimist peab iga hinna eest vältima. Mineraalsed ained ning niisked materjalid ei ole süttivad.

Kas õhk on tolmune või mitte, võib hinnata visuaalselt, kui päevavalguslamp ei ole mõne meetri kauguselt selgelt eristatav või üldine nähtavus ühe meetri kaugusele on nõrk.

Enamiku tolmu alumine plahvatuspiir on $20 - 60 \text{ g/m}^3$ (Randmaa, 2017). Tööstustes esineb tolmuplahvatusi pigem tootmisseadmete sees, katte all.

Tolmuplahvatuse tekkimiseks on vaja kolme teguri üheaegset koosmõju:

1. süttivatest ainetest moodustunud tolmutüvi, mille osiste valdava osa mõõdud jäävad alla $500 \mu\text{m}$ ehk $0,5 \text{ mm}$;
2. õhus peab olema piisaval määral hapnikku ehk rohkem kui 10%;
3. süüteallikaks võib olla lahtine leek või sellest lenduvad sädemed, soojuskiirgus, elektriseadmete ja staatilise elektri või lihvimisel põhjustatud sädelemine, kuid ka keevitus- ja lõiketööd ning ülekuumenenud laager (Randmaa, 2017).

Kuna jäätmete töötlemise ettevõtetes on kõik kolm tegurit pea kogu aeg olemas, siis on sealne olukord väga ohtlik ning mõelda tuleks tolmuplahvatuse ennetamisele.

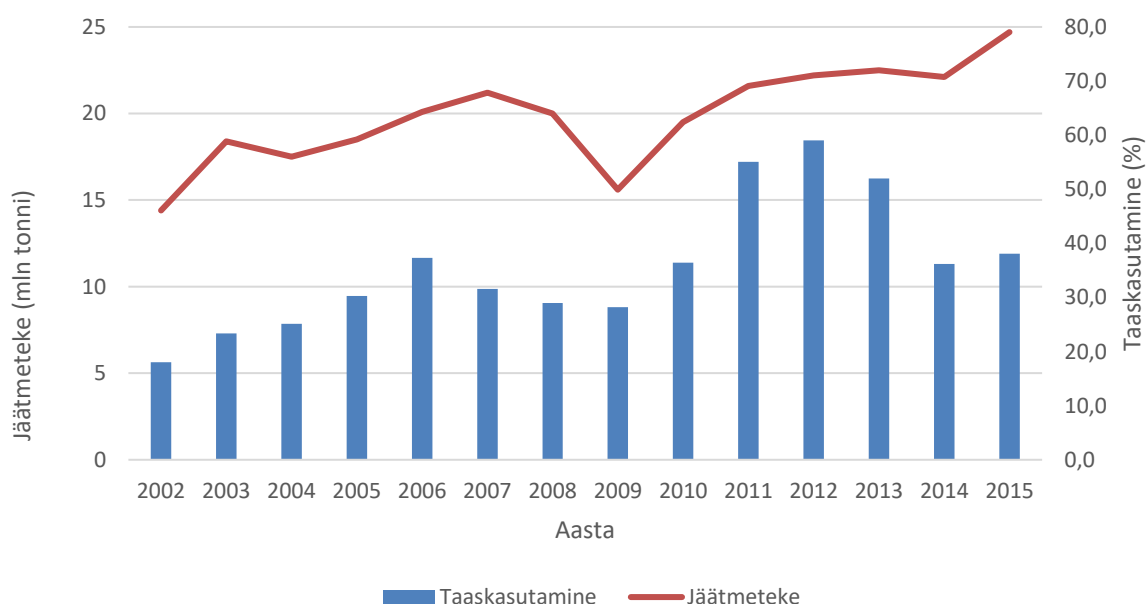
Erinevad tolmu ja õhu segud süttivad erinevatel temperatuuridel. Tolmu plahvatamisele tundlikes temperatuurivahemikes ei tohiks lubada seadmekorpuste pinnatemperatuuri tõusta üle $2/3$ võrreldes ümbritseva tolmu ja õhu segu vähima süttimistemperatuuriga. (Randmaa, 2017)

2. JÄÄTMETE ÜLDISELOOMUSTUS

2.1 Jäätmekäitluse areng

Jäätmed on mis tahes jäätmekategooriasse kuuluv vallasasi, mille valdaja on ära visanud, kavatseb seda teha või on kohustatud seda tegema (Jäätmeseadus, 2004). Kasvav jäätmete hulk on väga oluline probleem kõigis Euroopa riikides. Eestis reguleerivad jäätmete taaskasutamist ja jäätmekorraldust jäätmeseadus ja pakendiseadus (Jäätmeseadus, 2004; Pakendiseadus, 2004).

Euroopa liidu 28 liikmesriigil tekkis 2014. aastal kokku ligikaudu 2500 miljonit tonni jäätmeid (Waste statistics, 2016). Enim jäätmeid tekkis Saksamaal (387 504 241 tonni), Prantsusmaal (327 931 049 tonni) ja Suurbritannias (251 037 228 tonni) (Waste statistics, 2016). Eestis tekkis 2010. aastal jäätmeid 19 000 195 tonni, 2012. aastal 21 990 313 tonni ning 2014. aastal 21 804 040 tonni (Waste statistics, 2016). Jäätmete ke ja jäätmete taaskasutamine on välja toodud joonisel 2.



Joonis 2. Jäätmete taaskasutamine perioodil 2002-2015 (Statistikaamet, 2014)

Jäätmete taaskasutamine on jäätmekäitlustoiming, millega jäätmed või neis sisalduv aine või materjal võetakse kasutusele toodete valmistamisel, töö tegemisel või energia tootmisel, või seda ettevalmistaval tegevusel (Jäätmeseadus, 2004). Jooniselt 2 on näha, et jäätmete taaskasutus Eestis on üldjoontes kasvanud, olles 2002. aastal ligi 18% ja 2015. aastal umbes 38%. Joonisel nähtav jäätmete ja taaskasutuse langus aastatel 2008 ja 2009 on põhjustatud majanduskriisist. Sel aastal toimus toodangu vähenemine puidutööstuses, veonduses, ehituses ning naha- ja tekstiilitööstuses (Leevik, M., Liiver, M. jt, 2012). Võrreldes 2007. aastaga vähenesid järgneval kahel aastal puidutöötlemisega seotud jäätmes keskmiselt 42%, ehitusjäätmed 37% ning naha- ja tekstiilitööstuse jäätmed 40%. 2011. aastal taaskasutamise osakaal taaskord suurenes. Viimase põhjustajaks peetakse peamiselt põlevkivi aheraine taaskasutuse suurenemist (Spielberg, 2015).

Jäätmehoolduses järgitakse jäätmehierarhia põhimõtet (Jäätmeseadus, 2004). Selle kohaselt tuleb kõigepealt eelistada jäätmetekke vältimist, seejärel tuleb jäätmeid korduvkasutada (Jäätmeseadus, 2004). Nendele käitlusviisidele järgneb ringlusesse võtmine ja muul viisil taaskasutamine ning kõige viimasel kohal jäätmehierarhias on jäätmete kõrvaldamine ehk prügilasse ladestamine. Riigi jäätmekava 2014–2020 sätestab erinevate jäätmeliikide ringlussevõtu sihttasemed aastaks 2020 (tabel 4).

Tabel 4. II Strateegiline eesmärk (Riigi jäätmekava, 2014)

Võtta jäätmeid ringlusesse või neid muul viisil taaskasutada maksimaalsel tasemel		
Möödik	Baastase 2011	Sihttase 2020
Olmejäätmete ringlussevõtu osakaal olmejäätmete kogumassist	27%	50%
Pakendijäätmete ringlussevõtu osakaal pakendijäätmete kogumassist	56% (2010)	60%
Biolagunevate jäätmete ringlussevõtu osakaal olmejäätmete kogumassist	5%	13%
Biolagunevate jäätmete osakaal ladestatavates olmejäätmete kogumassis	57%	20%
Ehitus-lammutusjäätmete taaskasutuse osakaal nende jäätmete kogumassist	72%	75%
Elektroonikaromude kogumise osakaal kolmel eelneval aastal turule lastud elektri- ja elektroonikaseamete kogumassist	50%	65%
Kantavate patarei ja akujäätmete kogumise osakaal jäätmete kogumassist	33%	45% (2016)

Ehitusjätmete hulk on küll aastast aastasse vähenenud, olles aastal 2008 ligi 1,7 miljonit tonni, aastal 2009 1,3 miljonit tonni ning aastal 2010 1,1 miljonit tonni, siis aastaks 2020 tuleb igal aastal tekkinud kogusest taaskasutada vähemalt 75%. Olmejätmete liigiti kogumise edendamine ja olmes tekkivate biojätmete eraldi kogumine ja prügikütuse üha suurenev tootmine alates 2009. aastast on vähendanud olmejätmete ladestamist (Leevik, M., Liiver, M. jt, 2012). Mistõttu näeb Eesti riigi jäätmekava ette, et biolagunevate jätmete osakaal ladestavates olmejätmete kogumassis peab 2011. aastast 2020-ndaks aastaks langema 37%. taaskasutamise sihttasemed on määratud olmejätmetele, pakendijätmetele, biolagunevatele jätmetele ehitus- ja lammutusjätmetele, elektroonikaromude kogumisele ja kantavate patareide ja akujätmete kogumisele. Kõigi jätmete taaskasutamiseks ettevalmistamine tekitab mingil määral tolmu ning see on väga suur probleem kõigis jäätmekäitlusettevõtetes.

2.2 Tolm jäätmekäitluses

Jäätmekäitlus jõuab järk-järgult olukorrani, kus enamus tekkinud jätmetest taaskasutatakse. Jätmete taaskasutamisele võtmine tähendab, et jätmeid tuleb esmalt sorteerida ning edaspidi masinatega töödelda (näiteks segada, purustada). Seesugused töötlemised tekitavad aga suurel hulgal tolmu, mis saastab ümbritsevat õhku ning kahjustab nii inimeste tervist kui ka materjalide eluiga.

Eriti ohtlikuks teeb olukorra jäätmekäitluses see, et jätmete hulgas on väga palju eri sorti jätmeid ning osad neist võivad olla lausa tervisele ohtlikud. Kuna tolmu võib teatud tingimustes ka plahvatada, siis tolmu leviku piiramine jäätmekäitlustehastes on väga olulisel kohal. Magistriöös katsetatavat uduvihmutussüsteemi kavatakse kasutada siseruumides.

Töö eesmärk on välja selgitada uduvihmutuse efektiivsus tolmu leviku tõkestamiseks ning teha katse tulemuste põhjal järeldusi võimalikeks muudatusteks taaskasutusega tegelevatele ettevõtetele. Reaalsed tolmu kogused jätmetetöötlemisega seotud ettevõtetes on nähtavad joonistel 3 ja 4 ning puiduga tegelevas ettevõttes joonisel 5.



Joonis 3. Tolmune ruum jäätmekäitlusega tegelevas ettevõttes (Foto: Mait Kriipsalu)



Joonis 4. Seadmetele ladestunud tolm jäätmekäitlusega tegelevas ettevõttes (Foto: Mait Kriipsalu)



Joonis 5. Puidutolmu kogumine tolmu kogumise imuriga (Christiana, 2012)

Kui joonisel 3 on näha, et tolmu ei ole jõudnud veel maha sadeneda ning hõljub veel õhus, siis joonisel 4 on näha ladestunud tolmu. Joonised näitavad, et jäätmetega tegelevas ettevõttes on väga palju tolmu. Joonisel 5 on näha, kuidas saab tolmu koguda kohe tekkekohas ning seetõttu ei ole vajadust ventileerida kogu ruumi. Jäätmekäitluses tehakse sama aga mõnikord on seadmed nii suured, et sama moodi tolmu imeda ei saa. Sellisel juhul tuleks tolmu maha suruda või veelgi parem, kui seda saaks teha lokaalselt tolmu tekkimispaiga läheduses.

3. VIHMITID TOLMUTÕRJES

3.1 Peamised tolmutõrjemeetodid siseruumides

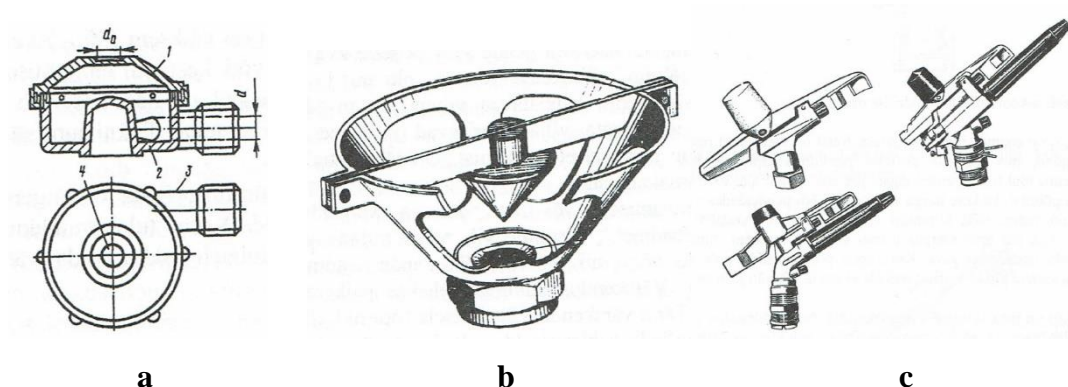
Kodudes kasutatakse tolmu eemaldamiseks tolmuimejat, kuid tööstustes tekib tolmu kordades rohkem ning tolmuimejast jääb väheks. Seetõttu on pea igas tööstuses välja ehitatud ventilatsioonisüsteem, mis tõmbab tolmu õhu ruumist välja ning asendab selle tolmuvaba õhuga. On valida loomuliku ja mehaanilise ventilatsioonisüsteemi vahel. Loomulik ventilatsioon on ventileerimisviis, kus õhuvahetus toimub õhu tiheduse vahe ja tuule toimel tekkinud rõhkude vahe tõttu (Angelstok, 2006). Mehaaniline ventilatsioon on nii-öelda sundventilatsioon, kus õhk liigub ruumi ja ruumist välja ventilatsiooniseadmete abil (Angelstok, 2006). Seesugune süsteem koosneb sissepuhke- ja väljatõmbesüsteemidest ning vahetab välja kogu ruumi õhu. Kui tolmu tekitab mõni üksik seade, siis tasuks tolmutõrje paigaldada selle vahetusse lähedusse, näiteks paigaldatakse kohtatõrjeme puidulihvimise tööpingi juurde.

Käesolevas magistritöös viiakse katsed läbi puidutolmuga. Puidutolmu leviku tõkestamine siseruumides on tehniliselt keeruline ning selle sattumist nii töökeskkonna õhku kui väliskeskkonda tuleb püüda vältida või viia miinimumini (Randmaa, 2017).

Enamasti kasutatakse selleks kohtatõrjeme- ja üldventilatsioonisüsteeme, kuid kaasa aitavad ka seadme eraldamine muust töökeskkonnast ning jäätmete teisaldamine torusüsteemi (Randmaa, 2017). Selle magistritöö katsetes üritatakse tolmu levikut tõkestada uduvihmutusseadme abil. Tootmis- ja tööruumides annab õhu niisutus palju eeliseid, näiteks on parem materjali töötlemine ja stabiilsem tootmisprotsess (Randmaa, 2017).

3.2 Vihmutusest ja sadenemisest

Vihmutuse all peetakse silmas niisutusviisi, mille korral surve all olev vesi paisatakse vihmutitega õhku. Vesi pihustub vihmana aluspinnale ning selle käigus niisutab nii mulda, taimi kui ka õhku. Vihmutid jaotatakse peamiselt kolmeks: deflektorvihmutid, tsentrifugaalvihmutid ja jugavihmutid (joonis 6).



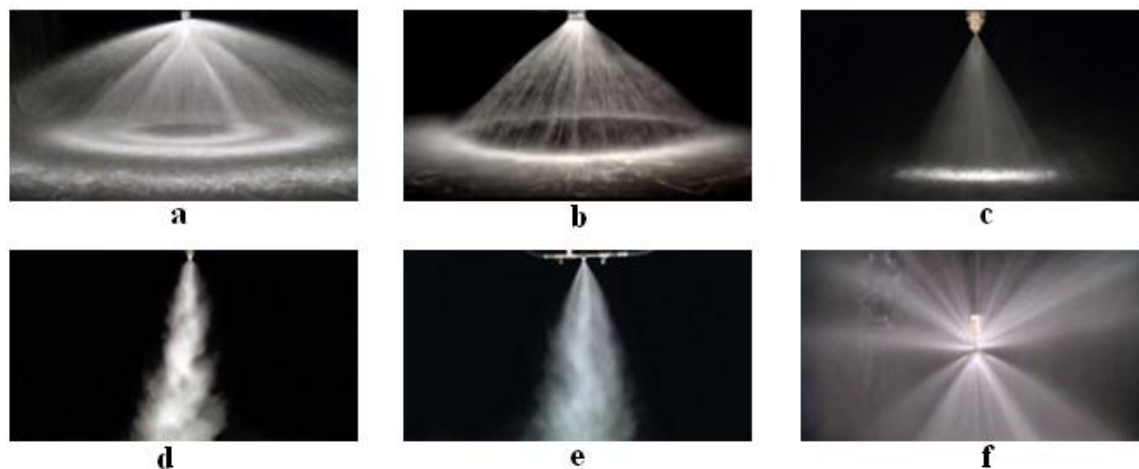
Joonis 6. Vihmutite skeemid: a) deflektorvihmuti; b) tsentrifugaalvihmuti; c) jugavihmuti (Tamm, 2000)

Deflektorvihmutite veejuga pihustatakse piiskadeks düüsi ette asetatud deflektoriga. Tsentrifugaalvihmutis liigub vesi tsentrifugaaljõu mõjul - jõud lõhub joa piiskadeks ja paiskab need vihmutist eemale. Jugavihmuti veejuga pihustub löögil vastu õhku ning suure surve ja joatoru nurga tõttu lendab juga kaugemale, mistõttu ei pruugi jugavihmuti lähedale vett maha langedagi. (Tamm, 2000)

Uduniisutusega saab suurendada õhuniiskust ja alandada õhutemperatuuri, mistõttu on see sobilik taimedele kaitseks atmosfääripõua eest. Algselt olid vihmudid mõeldud mitmesuguste põllukultuuride niisutamiseks, kuid seesugused seadmed võimaldavad teha muudki, näiteks kasutada vihmuteid taimede kaitsmiseks öökülmade eest ning tolmutõrjes.

Vihmutusel on põllumajanduses kasutades palju eeliseid. Peamised neist on hea niisutusühtlus, pindmise äravoolu mitte tekkimine, vähese veehulga vajadus, vähene tööjõukulu ja võimalus automatiseerida (Tamm, 2000). Miinusteks on suur soetuskulu ning suuremad käitluskulud kui mittesurvelisel süsteemil (Tamm, 2000). Sõltuvalt kasutatavatest düüsistest, peab olema vesi piisavalt puhas. Mida väiksem on düüsil pihustusava, seda puhtam peab olema vesi, et düüsi ava ära ei ummistuks.

Düüse saab jaotada pihustuskuju järgi kuueks tüübiks: täiskoonusdüüsid, õõneskoonusdüüsid, lehvikdüüsid, udupihustid, pihustid ja paagipesu pihustid (joonis 7).



Joonis 7. Mitmesuguseid düüse (a - täiskoonusdüüs, b – õõneskoonusdüüs, c – lehvikdüüs, d – udupihusti, e – aurupihusti, f – paagipesu pihusti) (Projecta Balti AS, 2017)

Täiskoonusdüüsid tekitavad pritsimisel aga seest täis ringi kujulise mustri. Õõneskoonusdüüsid tekitavad pritsimisel ringikujulise mustri, mis on seest tühi. Lehvikdüüsid tekitavad piiskadega sirgjoone kujulise mustri. Lehvikdüüside pihustusnurk jääb enamasti 0–145 kraadi vahele. Udupihustid on hüdraulilistest pihustitest kõige võiksema suurusega tilku tekitavad pihustid. Udupihustitega saab tekitada kuivudu (tilga suurus 10–20 μm), märgudu (tilga suurus 20–30 μm) ja udu (tilga suurus 30–60 μm). Difuusorid erinevad teistest pihustitest tilga moodustamise protsessi poolest. Kui tavalistes pihustites ehk vedeliku rõhul toimivates pihustites toimub tilkade tekkimine tänu vedeliku kokkupõrkele pinnaga ja selle juhtimisel läbi vastavakujulise augu, siis pneumaatilistes pihustites kasutatakse selleks suruõhku või gaasi, et pihustada vedelik väikesteks tilkadeks. Õhk düüsid on kasutamiseks suruõhuga või auruga. Paagipesu pihustid on erilised selle poolest, et need pihustavad igale poole ümber düüsi (360 kraadi). Neid on nii keerlevaid pihusteid kui ka fikseeritud kinnitustega pihusteid (Projecta Balti AS, 2017).

Kuna käesolevas magistritöös kasutatakse lehvikdüüse, mis töötavad hästi ka tavalise Tartu ühisveevärgi veega ning et katse on katlakivi või muu sellise ummistuse tekkimiseks piisavalt lühike, siis pihustatava vee täiendavale puhastamisele käesolevas magistritöös ei keskenduta.

Puidu-tolmu levikut tõrjutakse kahel viisil. Esimene olukord on see, kus tolmu veel tekkinud ei ole ja veepihustite abil ennetatakse tolmu teket puidumaterjali niisutamisega (Faschingleitner jt., 2010). Teine olukord on see, kus tolmu on juba tekkinud ja levib õhu kaudu ning vee abil üritatakse tolmu õhust maha suruda (Faschingleitner jt., 2010).

3.3 Eri vihmutusviisid tolmu tõkestamisel

Inglismaal tegutsev ettevõtte Airspectrum pakub väga palju erinevaid tolmu leviku takistamise viise, mida saab kasutada nii kaevandustes, prügilas, kompostiplatsil ning ehitus- ja lammutustöödel. Kõik süsteemid on mõeldud tolmu mahasurumiseks ja ühtlasi haisu neutraliseerimiseks, sest haisu põhjustavad ühendid asuvad enamjaolt tolmuosakeste küljes. Haisu neutraliseerimiseks võib pihustatavasse vette lisada haisu neutraliseerivaid kemikaale. Kõik süsteemid sobivad nii sise- kui ka väliskeskkonda ja kõiki on olemas ka teisaldatavaid versioone.

Düüside rivi süsteem:

Ühed düüside rivi süsteemidest on Pacific 75, 125 ja 250 süsteemid. Pacific 75, 125 ja 250 on süsteemid, mis koosnevad vastavalt 75-st, 125-st ja 250-st pihustist, mis asetatakse ühekahe meetrise sammuga. Süsteemi on võimalik saada ka erinõuete järgi, üks võimalik variant on välja toodud joonisel 8, kus on näha udukardina suunamist kompostimisaunale sellest eralduva haisu tõrjeks (Air spectrum, 2017).



Joonis 8. Eritellimusel kujundatud düüside rivi süsteem (Air spectrum, 2017)

Veepihusti:

Veepihustid on seadmed, mis töötavad tsentrifugaaljõu mõjul, suunates pihustatud vedeliku uduna õhku (joonis 9). Vesi juhitakse ratta või kettani, mis pööreldes paiskab pihustunud vee õhku. Komplekti kuulub 1125 liitrine mahuti, millest piisab ühe päeva veepihusti seadme töötamiseks. Ventilaatorit antud süsteemis ei ole.



Joonis 9. Vortex rotatsioonipihusti (Air spectrum, 2017)

Veetarbimine on veepihustil 0,5 kuni 3 liitrit minutis. Veepihusti tekitab peenelt pihustatud udu kuni 20 meetri kaugusele (Air spectrum, 2017).

Vortex ventilaator:

Vortex ventilaator on pihustussüsteem, kus vesi pumbatakse läbi ventilaatorilabade, mis purustavad veejoa peeneks uduks ning ventilaator puhub pihustunud vee ühtlasi ka kaugemale (joonis 10). Kui veepihustil ventilaatorit polnud, siis sellel on ning süsteem võib vett pihustada 350 kraadi raadiuses. Ventilaator on võimeline puhuma vedelikuosakesi kuni 10 m kaugusele (Air spectrum, 2017).



Joonis 10. Vortex ventilaator (Air spectrum, 2017)

Tolmutõrjekahur:

Tolmutõrjekahurid on kahurid, kus düüside abil pihustatakse vesi ventilaatoriga tekitatud õhuvoolu. Tööorgan koosneb tolmutõrjekahuri otsa ringina paigutatud 18-st düüsisist, mis suunavad vee ringi sisse ventilaatori poolt tekitatud õhuvoolule. Õhuvool paiskab pihustatud vee kaugemale õhku. Valikus on 1000 ja 2000 liitrised veepaagid,. Veepiisa suurus on 50 kuni 150 mikromeetrit. Pihustatud vee levikukaugus sõltub suuresti ümbritsevast tuule kiirusest ja suunast, kuid ulatub kuni 30 meetri kaugusele (joonis 11) (Air spectrum, 2017).



Joonis 11. Tolmukahur (Air spectrum, 2017)

Muud lahendused:

Tolmutõrjerõngas:

Tolmutõrjerõngaks nimetatakse düüse tihedalt täis rõngakujulist toru, kus düüsides pihustatav vesi moodustab konveierilt läbi rõnga langeva tolmurikka materjalivoo ümber maapinnani ulatuva udukardina (joonis 12) (Dust boss, 2017).

Tolmutõrjerõngas on väga sarnane tolmukahuriga. Mõlemal on düüsidega ringi kujuline veesüsteem, kuid tolmukahuril on düüsid suunatud ventilaatorist tulevale õhuvoolule. Tolmurõngal ventilaator puudub ja düüsid on enamjaolt suunatud alla või natukene ringi sisse. Komplekti kuulub ringikujuline düüsides rivi süsteem. Eeldatakse, et tolm ei levi udukardinast välja vaid langeb koos veega maha.



Joonis 12. Tolmutõrjerõngas (Dust boss, 2017)

2) Vee suunatud pihustamine:

Vee suunatud pihustamiseks nimetatakse süsteemi, kus kolme või enama pihusti abil pihustatakse vett sinna, kus seda kõige rohkem vaja on, näiteks konveierilintidelt mahakukkumisel (joonis 13) (Dust boss, 2017).



Joonis 13. Vee pihustamine konveierilt langevale puistematerjalile (Dust boss, 2017)

Joonisel 13 näidatud vee suunatud pihustamine võib pihustada kuni kolme meetri kaugusele (Dust boss, 2017).

4. LABORKATSED

4.1 Eesmärk ja hüpotees

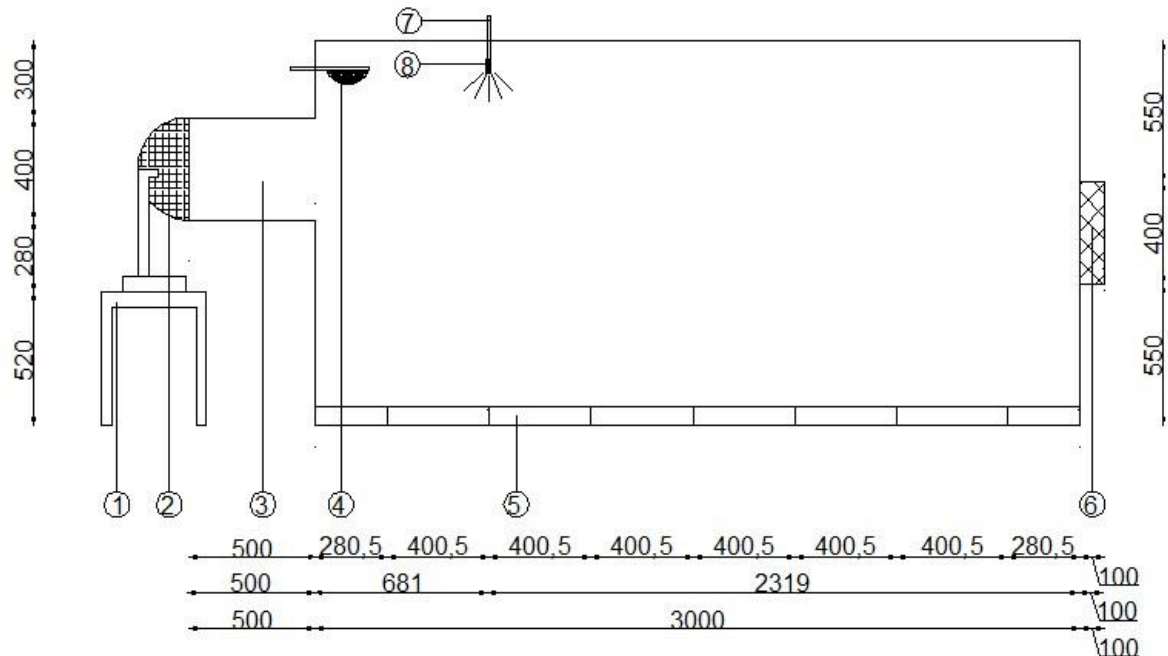
Laborkatsete eesmärk on uurida uduvihmutuse mõju tolmu leviku tõkestamisele. Katsete käigus loodi tehisklik olukord, kus põrkuvad omavahel kokku tolmu- ja veeosakesed ning uuriti, kui suur mõju on uduseinal tolmu leviku tõkestamisele siseruumides. Käesoleva magistritöö hüpotees põhineb J. Faschingleitneri ja W. Höflingeri 2010. aastal avaldatud teadusartiklil „Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling“, mis tõestab, et uduvihma abil on võimalik tolmu levikut õhus tõkestada ja maha suruda. Kuna Faschingleitner ja Höflinger olid varasemalt seda teemat juba uurinud, siis sai käesolevas magistritöös valitud teist tüüpi düüsid, teistsugune tolmu ja teised katseolud.

4.2 Katse materjal ja metoodika

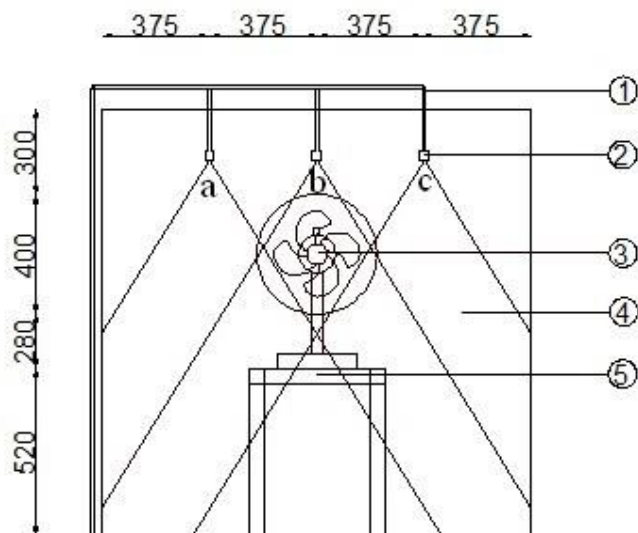
4.2.1 Katseskeem

Katse kujundati eeldusel, et tolmu levimine või tolmu õhu liikumine on suhteliselt aeglane. Selleks, et katsetada uduvihmutuse efektiivsust tolmu leviku tõkestamisel, ehitati tolmuühik, lisati tolmuannustamissüsteem ja veepihustussüsteem. Katsestend võimaldab sarnaseid katseid samasugustes katseoludes ka tulevikus teha. Seesuguse konstruktsiooni halvaks küljeks on aga düüside pihustamisel tekkinud õhuvool, mis käitub tavalisele tuulele vastu ja mõjutab tolmu levikut (Faschingleitner jt., 2010). Käesolevas magistritöös kasutati õõnes-koonusdüüside asemel lehvikdüüse ning seetõttu peaks düüside pihustamisel tekkinud õhuvool mõjutama tavalist ventilaatoriga tekitatud tuult vähem, sest düüsid pihustavad ülevalt alla, mitte ülevalt diagonaalselt ventilaatoriga tekitatud tuulele vastu. Tagajärjeks võib olla tulemus, kus tolmuosakesed ei puutu veeosakestega kokku ning uduvihmutusseade ei takista tolmu levikut (Faschingleitner jt., 2010).

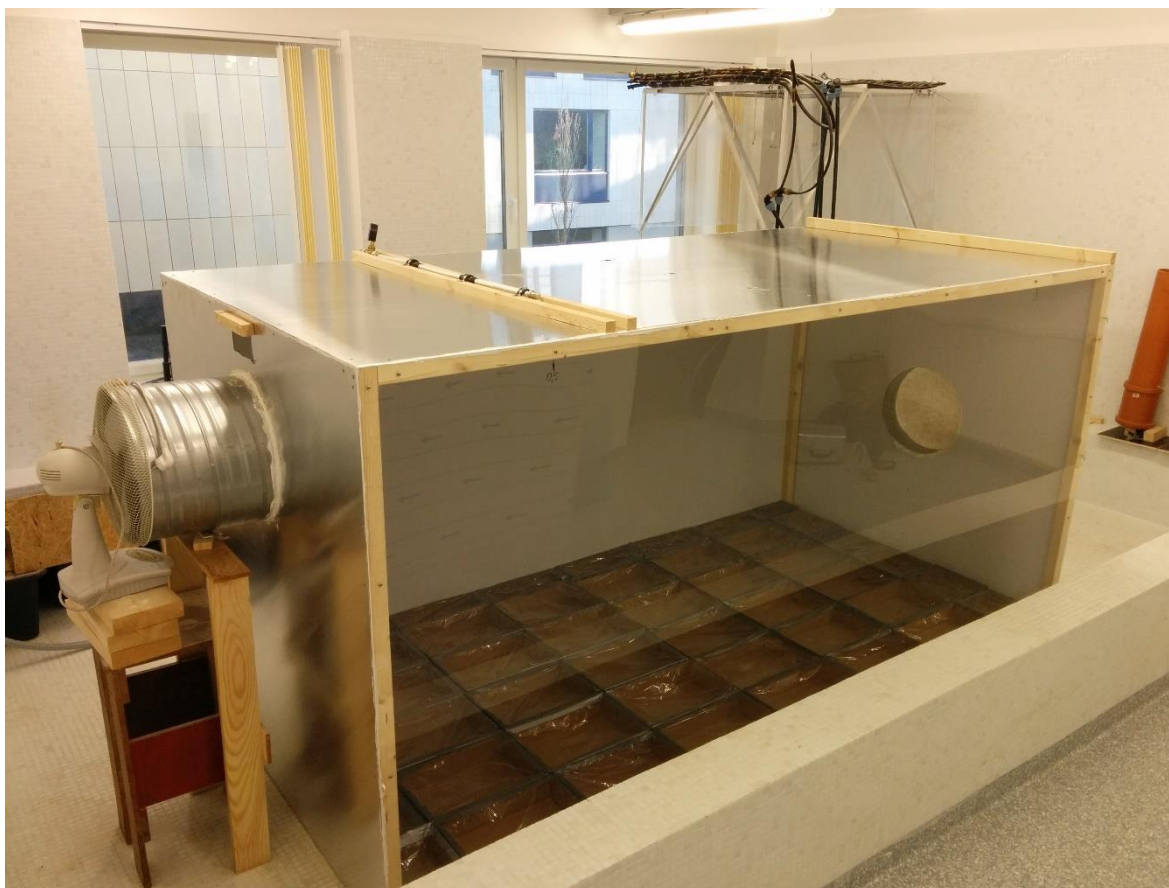
Katsed viidi läbi katsestendis (joonised 14, 15 ja 16). Õhk juhiti katsestendi kambrisse läbi 400 mm läbimõõduga ventilatsioonitoru ning välja läbi samasuguse, kuid filterkangaga kaetud toru.



Joonis 14. Laboratoorse katsestendi skeemi eestvaade (1 – ventilatori alus; 2 – ventilator; 3 – ventilatsioonitoru (läbimõõt 400 mm); 4 – sõel (ava: 1x1 mm); 5 – mõõdealus; 6 – filterkangaga kaetud 400 mm toru; 7 – veetoru; 8 – düüs (mark: NF-01)) (skeemil mõõdud millimeetrites)



Joonis 15. Laboratoorse katsestendi skeemi kõrvaltvaade (1 – alupex toru; 2 – NF-01 düüs; 3 – ventilator; 4 – vee jaotus katsestendis (pihustusnurgad a, b ja c on 63 kraadi); 5 – ventilatori alus) (skeemil mõõdud millimeetrites)



Joonis 16. Katsestend veemajanduse laboris

Joonisele 15 on peale märgitud düüside pihustusnurgad a, b ja c. Kõigi kolme düüsi pihustusnurk on 63 kraadi. Kasti siseneva ventilatsioonitoru pikkus on 0,4 meetrit ja kastist väljuva toru pikkus 0,1 meetrit. Kasti sisenevasse ventilatsioonitorusse tekitatakse tuul ventilaatori Elram AD-40 abil. Ventilaatoril on valida kolme kiirusrežiimi vahel. Kastist väljuva toru külge kinnitati M5 filterkangas, et kaaluda kastist väljuva tolmu kogust ja hoida laboriruum puhtana. M5 filterkangas on saadud Balti-Filtrid OÜ-st (Balti-Filtrid, 2017). Kasti tagakülg, pealmine ja otsaplaadid olid komposiitplaatidest. Külgede mõõdud on 1,5x3 meetrit ning otsaplaatide mõõdud on 1,5x1,5 meetrit. Komposiitplaat on 2 mm paksune ning vajaminevate lühiajaliste katsete teostamiseks piisavalt sile ja veekindel. Esikülg on läbipaistvast 3 mm pleksiklaasist mõõtudega 3x1,5 m. Kasti ühenduskohad tihendati universaalsilikooniga. Kasti avatav külg paigaldatakse ülejäänud kasti külge kolme hinge abil ning ümbritseti tihendiga. Ukse sulgemiseks on avatavale küljele paigaldatud kaks 35x35 mm riivi ning 3 haaki. Avatava külje materjaliks on valitud 2 mm paksune komposiitplaat. Ventilatsioonitorude ja kasti vahed täideti makrofleksiga. Katsestendi ehitamiseks vajaminev materjal on välja toodud tabelis 5.

Tabel 5. Katse jaoks vajaminev materjal

Jrk. nr.	Materjal	Kogus	tk/m	Märkus
1	Ventilaator Elram AD-40 (230V ~50Hz, 48W) Ventilaator on 3-astmeline.	1	tk	Tevent OÜ
2	Ventilatsioonitoru läbimõõt 400	1	m	Clix OÜ
3	M5 filterkangas	1	tk	Tevent OÜ
4	Komposiitplaat 2mm 1500x3000mm	3	tk	Proplastik OÜ
5	Pleksiklaas 3mm 1500x3000mm	1	tk	Proplastik OÜ
6	Puit 45x45 3m	8	tk	Puumarket AS
7	Puit 30x30 3m	1	tk	Bauhof Group AS
8	Puidukruvid peitpea 4x30 kollane Zn	70	tk	Bauhof Group AS
9	Plekikruvi ümarpea 4,8x32	25	tk	Bauhof Group AS
10	Lehthing 60x60mm	3	tk	Bauhof Group AS
11	Riiv 35x35mm	2	tk	Bauhof Group AS
12	Montaazivaht 600ml	1	tk	Bauhof Group AS
13	Universaalsilikoon 270 ml	1	tk	Bauhof Group AS
14	Tihend 9x7,5mm (pruun, kahekordne liim)	3	m	Bauhof Group AS
15	Sõel	1	tk	Bauhof Group AS

Katsestendile ei ehitatud alust ning stend asetseb Metsamajas paikneva labori D169 basseinis. Selleks, et katsestend oleks piisavalt õhukindel liimiti stend kleeplindi abil põranda külge. Katsestendi sisse jääb basseini trapp, mille kaudu üleliigne vesi stendist ära juhitakse. Kuna katsetes on vaja puistata tolmu liikuvale õhuvoolele, siis tehti katsestendi otsa, kust juhitakse õhk stendi, auk, et sõeluda katse ajal tolmu.

4.2.2 Uduvihmutuse süsteem

Vesi uduvihmutussüsteemi jaoks võeti ühisveevärgist. Veevärgi külma vee toru külge on pandud kolmiku abil Alupex toru, tagasilöögiklapp, veearvesti, filter ja kuulkraan. Veehaardest liigub vesi katsestendi 3/4'' armeeritud voolikuga ning ühendati katsestendi juures oleva sõlme külge voolikuklambri abil.

Katse jaoks kontrolliti veeallika maksimaalset vooluhulka. Selleks teostati veeallikaga kolm katset (tabel 6). Veeallika mõõtmisel fikseeriti iga katse alguses ja lõpus veearvesti näidud. Aega mõõdeti stopperiga.

Tabel 6. Külmaveetorust saadud maksimaalne vooluhulk läbi 3/4'' toru

Katse nr.	Veearvesti algnäit (m ³)	Veearvesti lõppnäit (m ³)	Vooluhulk (l)	Aeg (s)
1	12683	12699	16	60
2	12699	12715	16	60
3	12715	12731	16	60

Keskmiseks vooluhulgaks esimeses veeallikas on 16 l/min. Kuna katsetel kasutataval düüsil on vaja vähemalt 0,02 liitrit vett sekundis, siis valitud veehaare on katsete teostamiseks igati piisav. Uduvihmutussüsteemi ehitamiseks kuluv materjal on välja toodud tabelis 7.

Tabel 7. Uduvihmutussüsteemiks vajalik materjal

Jrk. nr.	Materjal	Kogus	tk/m	Märkus
1	Voolikuklamber 16-27 mm	1	tk	Eelnevalt laboris olemas
2	Ms kolmik 3/4"-1/2"-3/4" sk	1	tk	Eelnevalt laboris olemas
3	Ms nippel 3/4"	1	tk	Eelnevalt laboris olemas
4	Monomeeter Flexcon	1	tk	Eelnevalt laboris olemas
5	Kolmik 16x1/2"skx16	2	tk	Bauhof Group AS
6	Toru alupex 16mm 5m/rullis	1	tk	Bauhof Group AS
7	Põlv 16x1/2"sk alupex	1	tk	Bauhof Group AS
8	Liitmik alupex 16x3/4"sk	1	tk	Bauhof Group AS
9	Ahenev nippel messing 1/2"vkx1/4"sk	3	tk	Bauhof Group AS
10	Lehvikdüüs 1/4" vk NF-01	3	tk	BETE Fog Nozzle

Udusein tekitati kolme NF-01 düüsiga (tabel 8, joonis 17). Düüsid on tehtud firmas BETE Fog Nozzle USA-s. Eestisse tarnis düüsid Projecta Balti AS. Katsetel kasutatava düüsi NF01 kõrgus on 27 mm, laius 14,3 mm ning ava läbimõõt 0,66 mm. Düüsid on paigaldatud pihustama ülevalt alla ning ühendus torustikuga on 1/4'' sisekeerme abil. Lehvikdüüside abil tekitati udusein kogu katsestendi ulatuses.

Tabel 8. NF-01 düüsi veekulu

Toru läbimõõt	Düüsi mark	l/min							
		0,5 bar	0,7 bar	1 bar	2 bar	3 bar	5 bar	10 bar	30 bar
1/4"	NF01	0,16	0,19	0,23	0,32	0,39	0,51	0,72	1,25



Joonis 17. Katsetes kasutatavad NF-01 düüsid

Kasutades nii peenikese pihustusavaga düüse, peab düüse läbiv vesi olema puhas, kuid kuna tegemist on lühiajaliste katsetega, siis käesoleva magistritöö raames veepuhastusele ei keskendutud. Kuna katsete käigus olid veekogused väga väikesed, siis kanalisatsiooni ummistumist ei olnud vaja karta.

Katsed tehakse kahe vooluhulgaga, esimene on 0,019 l/s ja teine 0,011 l/s. Kuna laboris eelnevalt olemas oleva digitaalse rotameetri küljes oli ka sulgventiil, mida saab kasutada vooluhulga muutmiseks, siis tehtud katsete ajal kasutati veesurve muutmiseks digitaalset rotameetrit Burkert easy flow 8035, mille on tootnud Burkert SAS. Valmistatud on Burkert easy flow Prantsusmaal (Burkert, 2017).

4.2.3 Katsetes kasutatav tolm

Katsetes kasutatav tolm saadi Võrumaa Kutsehariduskeskusest puitdetailide lihvimise tulemusena. Tolm sõeluti 1x1 mm sõelaga läbi ning seejärel võeti kotist juhuslikult 30 osakest ning nende suurused mõõdeti mikroskoobi abil. Saadud tulemused on nähtavad tabelis 9.

Tabel 9. Katsetes kasutatava tolmuosakeste läbimõõt

Osakese nr.	Suurus (µm)
1	10
2	20
3	67
4	83
5	8
6	3
7	30
8	18
9	10
10	11
11	10
12	35
13	63
14	13
15	15
16	40
17	18
18	23
19	20
20	95
21	91
22	25
23	33
24	3
25	55
26	5
27	28
28	8
29	23
30	5

Keskmine
suurus: 28,9

Puit on orgaanilise päritoluga toormaterjal, mida iseloomustavad järgmised näitajad:

- tüüpiline puidutolmu osakeste suurus on 27 µm, käesolevas magistritöös saadi tolmuosakeste keskmiseks suuruseks 29 µm;
- alumine plahvatuspiir on 100 g/m³;
- maksimaalne plahvatuse rõhk on 9,5 bar;
- plahvatusliku edenemise kiirus 211 bar/s;

- süttimise temperatuur on vahemikus ~400-500 °C;
- hõõgumistemperatuur ~300-320 °C (Randmaa, 2017).

Kuna katsetingimused on küllaltki niisked ja tegemist on suhteliselt õhukindla katsestendiga, siis puidutolmu süttimise ohtu ei tuvastatud. On teada, kui kaua katsetes kasutatav tolmu õhus püsib, seega iga katse vahele jäeti 3 minutit, et tolmu maha sadeneks. Puidutolmu, mille suurus on:

- 1-4 mikromeetrit püsib õhus ~8 tundi;
- 5-9 mikromeetrit püsib õhus ~20 minutit;
- 10-14 mikromeetrit püsib õhus ~5 minutit;
- 15-29 mikromeetrit püsib õhus ~2,5 minutit;
- 30-49 mikromeetrit püsib õhus ~34 sekundit;
- 50-99 mikromeetrit püsib õhus ~12 sekundit;
- >100 mikromeetrit püsib õhus ~3 sekundit (Randmaa, 2017).

4.2.4 Mõõteriistad ja -metoodika

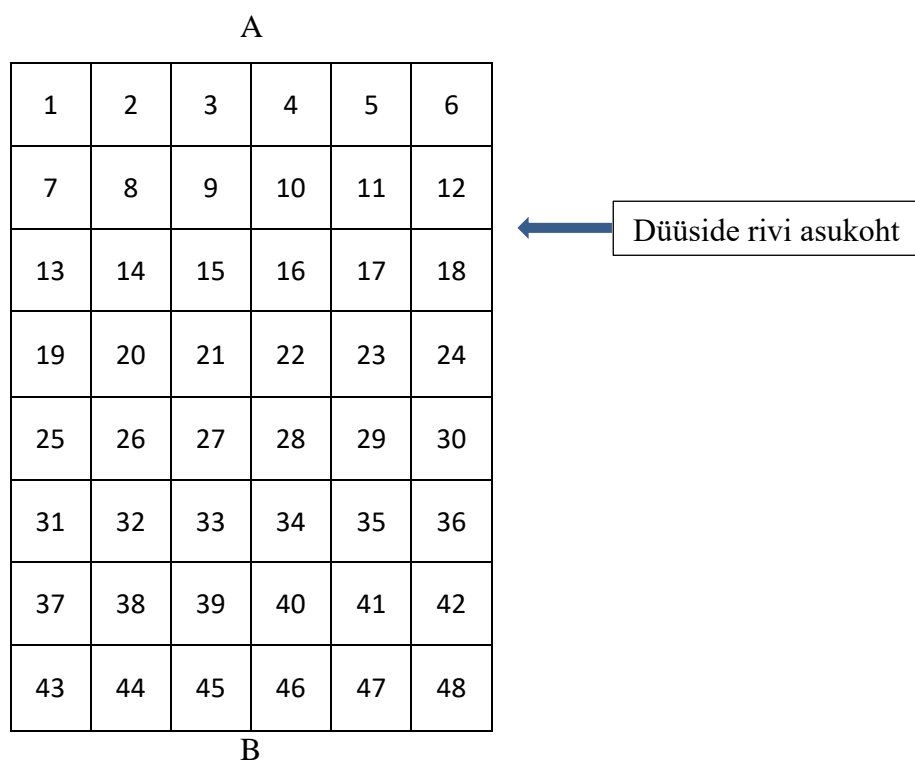
Katsed viidi läbi kinnises katsestendis, et väljaspool kasti liikuv õhk ei hakkaks mõjutama katsetulemusi. Iga katseseeria käigus puistati ventilaatorist tulevasse õhuvoolu 100 g puidutolmu. Kaalumiseks kasutati Šveitsis valmistatud Mettler Toledo PB602-S laborikaalu, mille miinimum on 0,5 g ja maksimum 610 g. Tulemused saadi 0,01 g täpsusega.

Tulemuste mõõtmiseks vajaliku materjali loetelu on välja toodud tabelis 10.

Tabel 10. Tulemuste mõõtmiseks vajalik materjal

Jrk. nr.	Materjal	Kogus	tk/m	Märkus
1	Käsikile 450x270mm	1	tk	Bauhof Group AS
2	Niiskuskindel teip 48mmx50m	1	tk	Bauhof Group AS
3	Pappkastid	48	tk	Suuremad toidupoed
4	Kaal	1	tk	Eelnevalt laboris olemas

Tolm sadenes mõõtestendi põrandale pandud mõõtealustele. Mõõtealustena kasutati pealt pakkekilega kaetud pappkaste (joonised 18 ja 19). Kastide jaotus katsestendis on välja toodud joonisel 9. Kastide number 6 ja 48 mõõdud on 17,5x28,5 cm, kastide 1, 2, 3, 4, 5, 43, 44, 45, 46 ja 47 mõõdud on 26,5x28,5 cm, kastide 12, 18, 24, 30, 36 ja 42 mõõdud on 17,5x40,5 cm. Ülejäänud kastid on mõõtudes 26,4x40,5 cm.



Joonis 18. Mõõtealuste kastide asetus ja numeratsioon (A - õhk sisse; B – õhk välja)



Joonis 19. Mõõtealused katsestendis

Algselt kaaluti ära mõõtealused, et nende kaalud hiljem katsete tulemustest maha arvutada. Peale igat katset kaaluti 48 mõõtekasti uuesti üle ning lisandunud kaal on vastavalt katsele tolmu, vee või tolmu ja vee kaal. Peale igat katset kaaluti ära ka katsestendist väljuva toru külge paigaldatud M5 filterkangas.

4.2.5 Tuulekatsed

Tuule kiirust mõõdeti tiivik-anemomeetriga Amprobe TMA10A (Taiwan), mõõtepiirkond 0,4 kuni 25 m/s, mõõtetäpsus n 0,01 m/s. Esimene katse seisnes tuule jaotuse mõõtmises katsestendi erinevates punktides. Õhu liikumiskiirus mõõdeti katsestendi sisenevas ja väljuvas torus ning stendi alguses, keskel kui ka lõpus viiel võrdsete vahedega kõrgustel.

Katsestendi alguseks nimetatakse katsestendi kasti ventilaatori poolset otsa ning lõpuks filterkanga poolset kasti otsa. Nende kahe vahele jääb katsestendi keskmine osa. Koostati tuule kiiruse jaotuse epüürid kasti alguses, keskel ja lõpus. Samad mõõtmised teostati kõigi kolme ventilaatori astmega. Mõõtmiste ajal düüsid ei töötanud ja tolmu ei lisatud.

4.2.6 Tolmukatsed

Teine katse seisnes kuiva tolmu leviku uurimisel katsestendis. Kasti siseneva õhuvoolu peale sõeluti aeglaselt 100 grammi tolmu. Mõõdeti, kui palju tolmu langes maha kasti alguses ehk enne uduseina ja kasti lõpuosas, peale uduseina. Ühtlasi mõõdeti, kui palju tolmu kandus kastist väljuvasse torusse. Selleks paigaldati katse ajaks kastist väljuva toru ette M5 filterkangas, mis kaaluti enne ja pärast iga katseseeriat. Lisandunud kaal näitas tolmu kaalu filtris. Tolmu leviku katsed teostati kolme ventilaatori astmega. Iga katse tehti kolmes korduses.

Iga katse näeb välja järgmine:

- 1) stopper tööle;
- 2) 5. sekundil ventilaator tööle;
- 3) 10. sekundil alustatakse tolmu annustamist ventilaatori õhujoasse;
- 4) 195. sekundil lõpetatakse tolmu annustamine ventilaatori õhujoasse;
- 5) 240. sekundil ventilaator kinni.

Peale ventilaatori seiskamist 3 minuti pärast alustati kaalumistega.

4.2.7 Katsed tuule ja veega

Kolmandas katseseerias uuriti, kui palju mõjutab õhu liikumine düüsidest langevaid veeosakesi. Algul mõõdeti vee jaotumine kastis siis, kui ventilaator ei tööta. Mõõdeti langenud vee kogused kasti eri osades. Seejärel korrati katset tingimustes, kus ventilaator töötab. Katse teostati kolme erineva ventilaatori kiirusastmega viies korduses. Ka selle katse puhul mõõdeti vee kogused kasti eri osades. Katseseerias tolmu ei lisatud.

Iga katse näeb välja järgmine:

- 1) stopper tööle;
- 2) 3. sekundil vesi tööle;
- 3) 5. sekundil ventilaator tööle;
- 4) 210. sekundil vesi kinni;
- 5) 240. sekundil ventilaator kinni.

Katsed tehti kahe erineva vooluhulgaga, ventilaatori kolme kiirusastmega ning viis katset esimese vooluhulgaga ja viis katset teise vooluhulgaga, kus ventilaator ei töötanud. Esimeseks vooluhulgaks on 0,019 l/s ja teiseks vooluhulgaks on valitud 0,011 l/s.

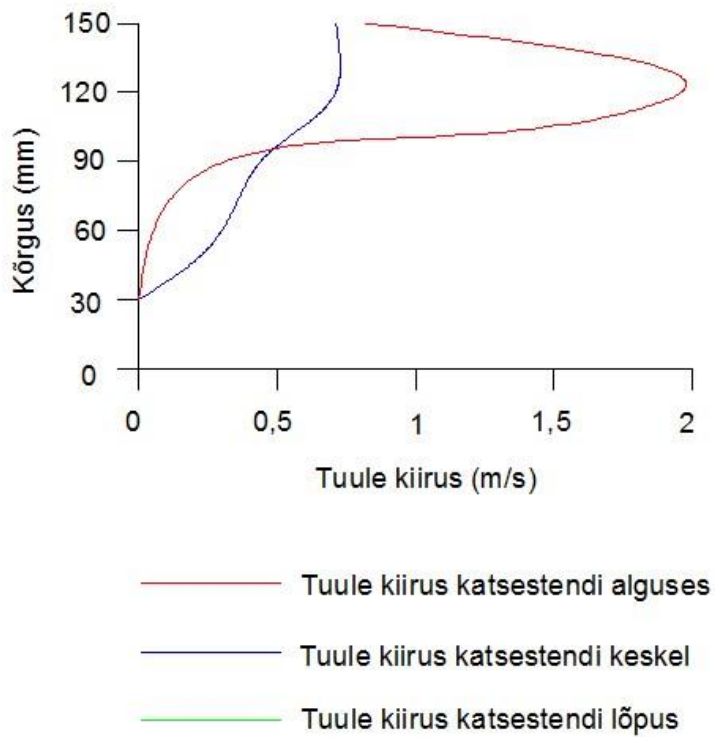
4.2.8 Katsed tolmu, tuule ja veega

Neljas katse seisnes tolmu leviku uurimisel õhu kolme eri liikumiskiirustega ja kahe erineva vooluhulgaga. Katse jooksul sõeluti kasti siseneva õhuvoolu kohal 100 grammi tolmu. Mõõdeti kasti algusesse ja lõppu langenud ning M5 filterkangasse kogunenud tolmu kaal. Katse ajal düüsid ja ventilaator töötasid. Katsed teostati kolmel eri tuulekiirusel, viies korduses.

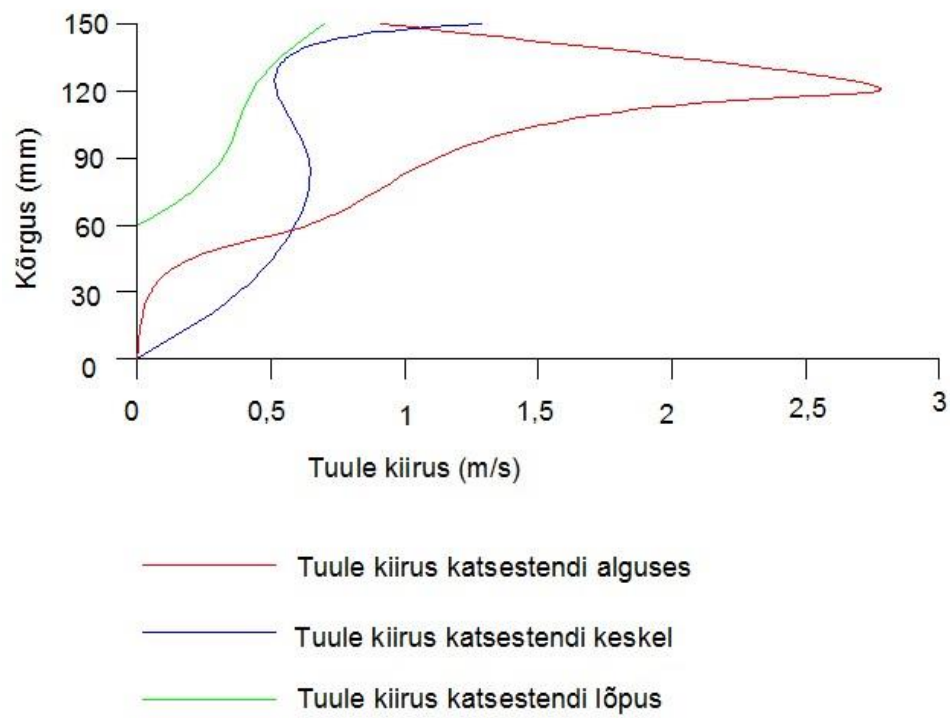
Iga katse näeb välja järgmine:

- 1) stopper tööle;
- 2) 3. sekundil vesi tööle;
- 3) 5. sekundil ventilaator tööle;
- 4) 10. sekundil alustatakse tolmu annustamine ventilaatori õhujoasse;
- 5) 195. sekundil lõpetatakse tolmu annustamine ventilaatori õhujoasse;
- 6) 210. sekundil vesi kinni;
- 7) 240. sekundil ventilaator kinni;

Peale ventilaatori seiskamist 3 minuti pärast alustati kaalumistega.



Joonis 21. Tuulekiiruse epüürid ventilaatori teise kiirusega



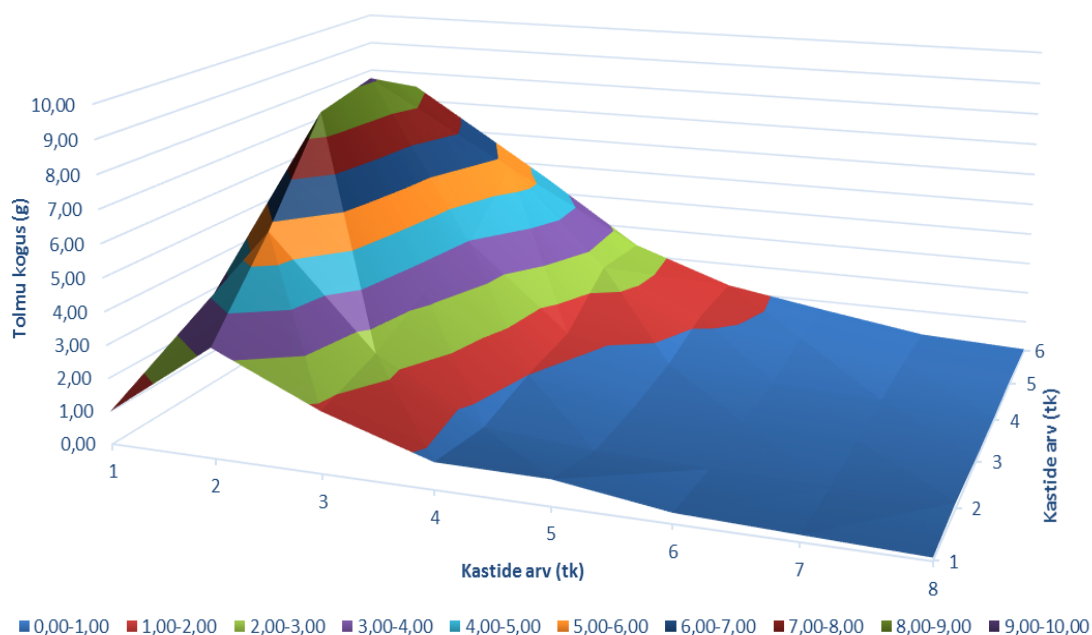
Joonis 22. Tuulekiiruse epüürid ventilaatori kolmanda kiirusega

Tulemustest on märgata, et katsestendi lõppu jõuab õhuvool ainult siis, kui ventilaator töötab kolmanda kiirusastmega. Sellisel juhul jõudis katsestendi lõpu ülaosasse tuul kiirusega 0,7 m/s. Katsestend üritati ehitada küll piisavalt õhukindel, kuid sõelumiseks tekitatud august ventilaatori kohal ning ka ventilaatori juurest oli tunda, et enamus sellest õhust, mis pidi välja liikuma kasti teises otsas oleva ventilatsioonitoru kaudu (koos M5 filterkangaga) liigub katsestendist välja hoopiski sõelumisaugu ja ventilaatori kaudu. Tolmu annustamiseks tehtud auku ei saanud kinni panna, sest muidu ei oleks saanud sõeluda. Esimese ja teise ventilaatori kiiruse astmega mõõdetavat tuult katsestendi lõppu ei tekkinud, kuid järgnevatest tolmu ja vee katsetest selgus, et ka katsestendi lõppu jõuab nii tolmu kui ka vee osakesi.

Katsestendi keskosasse jõudis liikuv õhuvool kõigi ventilaatori kiirustega. Kõige suurem õhuvool liikus katsestendi ülaosas, kus tuule kiirus ulatus 0,71 m/s kuni 1,29 m/s. Katsestendi alguses oli õhuvool kõige tugevam. Ventilaatori kolmanda kiirusega mõõdeti katsestendi alguses kiiruseks 2,77 m/s. Ventilaatori teise kiirusega saadi tulemuseks 1,96 m/s ning ventilaatori esimese kiirusega 1,55 m/s.

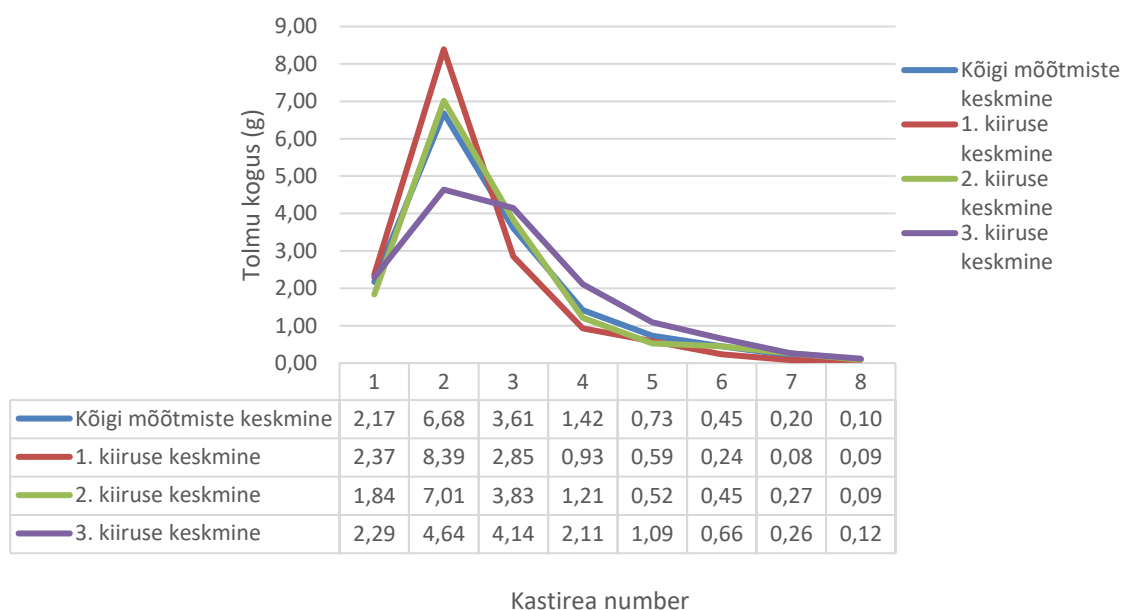
4.4.2 Tolmukatsed

Tolmukatsete tulemustest oli näha, et tolмага saavad kaetud kõik katsestendi kastid. Küll aga oli märgata, et katsestendi ühte äärde koguneb tolmu rohkem kui teisele. Tolmu kogunemine ühte äärde on põhjustatud sellest, et katsestendi ühendatud ventilatsioonitoru ei ole katsestendiga täiesti risti, vaid ventilatsioonitoru tõttu suunab ventilaator liikuva õhuvoolu katsestendi keskmest natukene vasakule poole. Ühtlasi suunab tolmu vasakule poole ka ventilaatorilabade pöörlemissuund päripäeva. Ventilaatori kolme kiirusega tehtud kõigi tolmukatsete keskmiste visuaalne graafik tolmu ladestumise kohta on välja toodud joonisel 23.



Joonis 23. Tolmukatsete keskmine tolmu ladestumine

Jooniselt 23 on näha, et enamus tolmut sadestus esimeses viies mõõtealuste reas. Kõigi katsete iga rea tolmu kogused näitavad, et esimeses reas ladestub keskmiselt 3,04 grammi 1000 cm² kohta. Teises reas ladestub 6,62 g 1000 cm² kohta, kolmandas 3,58 g 1000 cm² kohta, neljandas 1,40 g 1000 cm² kohta, viiendas 0,73 g 1000 cm² kohta, kuuendas 0,44 g 1000 cm² kohta, seitsmendas 0,20 g 1000 cm² kohta ja kaheksandas 0,14 g 1000 cm² kohta.



Joonis 24. Tolmu hulga sõltuvus tuulest

Jooniselt 24 saab järeldada, et mida väiksem on tuule kiirus, seda lähemale ventilaatorile paigaldatud katsealustesse langeb katse käigus sõelutud tolmu. Ventilaatori esimese kiirusega katsetel langes teise kastiritta keskmiselt 50 g tolmu, kuid ventilaatori kolmanda kiiruse korral langes samasse kastiritta kõigest 27 g tolmu, mida on esimese ventilaatori kiirusega katsete tulemusega võrreldes peaaegu poole vähem. Esimesse kastiritta jõudis kõige vähem tolmu teise ventilaatori kiirusastmega katsetel ning kõige rohkem ventilaatori esimese kiirusega. Esimesse ja teise kastiritta sadeneva tolmu kogused sõltuvad väga palju tolmu sõelumise täpsest asukohast ja kiirusest, mistõttu tolmu kogused kõikusid ventilaatori kõigi kiiruste juures väga palju.

Tolmukatsete tulemuste põhjal valiti düüside rea asukohaks teise ja kolmanda mõõtealuste rea vaheline koht. Selle põhjal langeb ventilaatori esimese kiiruse korral enne uduseina maha keskmiselt 69% ja peale uduseina 31% tolmu. Ventilaatori teise kiiruse korral langeb enne uduseina maha keskmiselt 58% ja peale uduseina 42% tolmu ning ventilaatori kolmanda kiiruse korral langeb enne uduseina maha keskmiselt 46% ja peale uduseina 54% tolmu.

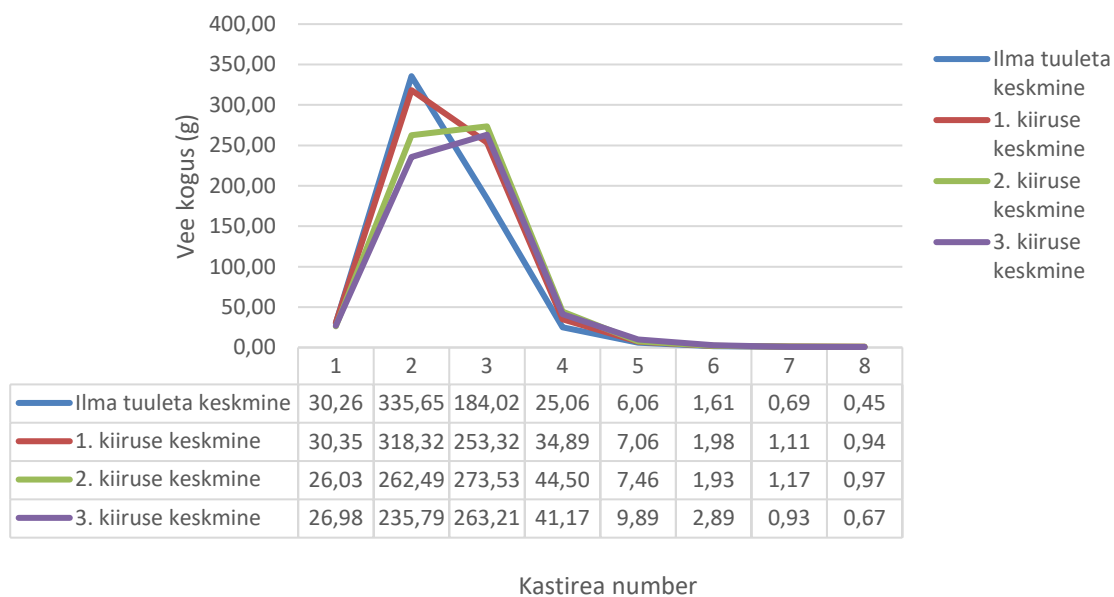
Iga katse järel mõõdeti katsestendist väljuva toru külge paigaldatud filterkanga kaal ning võrreldi kanga algkaaluga. Tuli välja, et igas katses jõudis filterkangasse keskmiselt üks gramm puidutolmu. Tolmukatsete käigus läks ventilaatori esimese kiirusega iga mõõtmise käigus kaotsi keskmiselt 6 g tolmu, ventilaatori teise ja kolmanda tuule kiirusega katsete korral keskmiselt 7 g tolmu.

4.4.3 Katsed tuule ja veega

Veekatseid sooritati kokku 40. Veekatsete tulemused on välja toodud joonistel 24 ja 25. Vett pihustati katse jooksul teise ja kolmanda kastirea vahekohta.

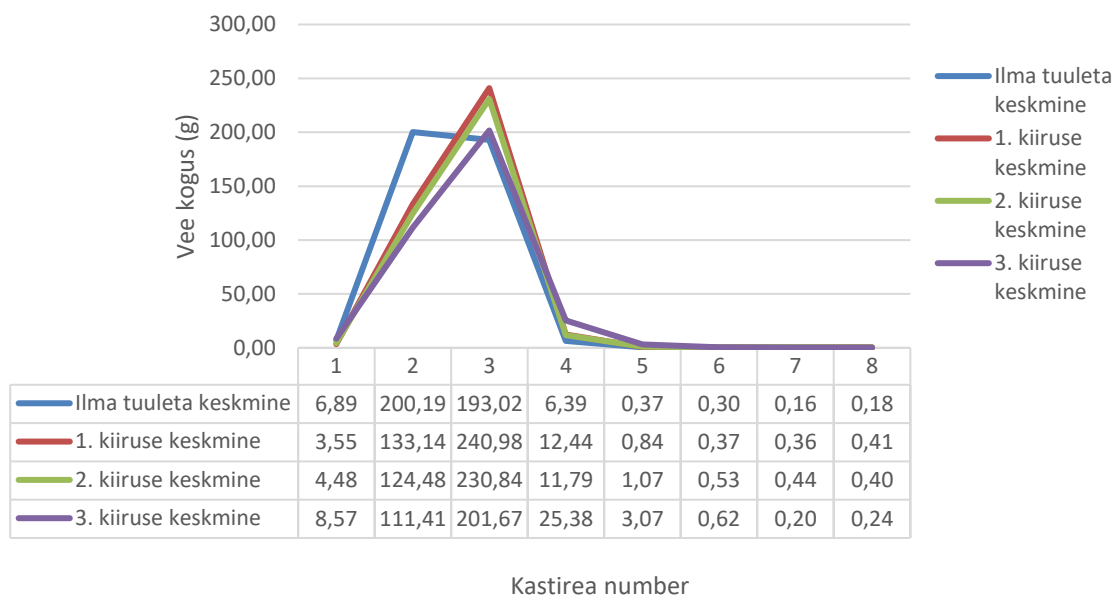
Õhu liikumine mõjutab udu lasumist katsestendis olulisel määral. Seisva õhuga tehtud katsete puhul jõuab teise kastiritta keskmiselt 336 grammi vett, kuid ventilaatori esimese kiirusastme juures tehtud katsetel jõudis samasse kastiritta 17 grammi ehk 5% vähem vett (joonis 24). Ventilaatori teise kiirusastmega tehtud katsetel jõudis teise kastiritta juba 73 g ehk 22% vähem vett ning ventilaatori kolmanda kiirusastme juures suisa 100 g ehk 30%

vähem vett, kui ilma tuuleta katsete puhul. Saab öelda, et mida suurem on tuul, seda rohkem mõjutab tuul veeosakeste liikumist kastis.



Joonis 24. Tuule ja vee katsete tulemused 0,019 l/s vooluhulga korral

Kuna teisest seitsmenda rea kastide pikkus oli 40,5 cm, siis joonise 24 põhjal saab järeldada, et tuul puhub veeosakesi umbes 60 cm võrra edasi (kastide asetust vt. joonis 18). Enamus vett kogunes esimesse nelja kastiritta. Ilma tuuleta esimese vooluhulgaga katsete korral kogunes esimesse nelja kasti keskmiselt 575 grammi vett ja viimastesse nelja kastiritta ligikaudu 9 grammi vett. Vooluhulga 0,019 l/s korral ning ventilaatori esimese kiiruse juures tehtud katsetel kogunes esimesse nelja kastiritta keskmiselt 640 grammi vett, ventilaatori teise kiirusega 607 grammi vett ja ventilaatori kolmanda kiirusega umbes 567 grammi vett.



Joonis 25. Tuule ja vee katsed 0,011 l/s vooluhulga korral

Joonisel 25 on näha tuule ja vee katsete tulemused teise vooluhulga korral. Joonisel märgitud veekogus on iga kastirea veekoguste keskmine. Ilma tuuleta teise vooluhulgaga katsete korral jõudis esimesse nelja kastiritta umbes 406 grammi. Ilma tuuleta teise vooluhulga korral jõuab viimastesse nelja kastiritta kõigest 4 grammi vett. Teise vooluhulgaga ventilaatori esimese kiiruse korral jõuab esimesse nelja kastiritta umbes 406 g vett, ventilaatori teise kiiruse korral 390 grammi vett ning ventilaatori kolmanda kiiruse korral 372 grammi vett. Ventilaatori iga kiirusastme korral jõuab viimastesse nelja kastiritta keskmiselt üks kuni 2,45 grammi vett.

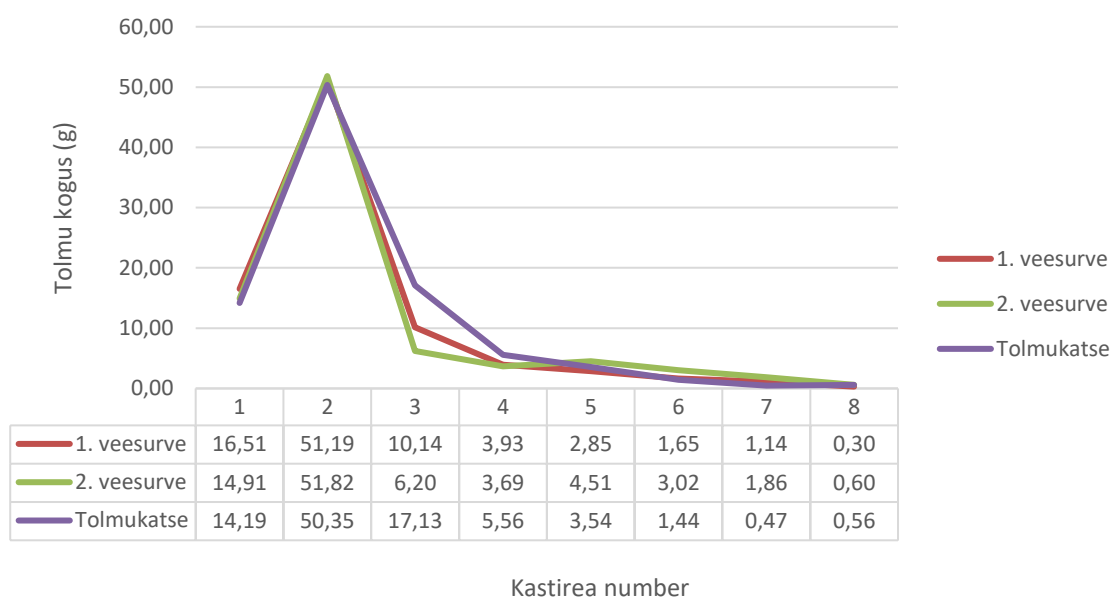
Katsetest oli näha, et esimese vooluhulga ehk 0,019 l/s korral jõudis kastidesse keskmiselt 607 grammi vett ning teise vooluhulga 0,011 l/s korral jõudis kastidesse keskmiselt 381 grammi vett. Arvutuste kohaselt (dүүisid töötasid katsetes 207 sekundit) oleks pidanud kastidesse jõudma esimese vooluhulga korral 3,93 liitrit ning teise vooluhulga korral 2,28 liitrit vett. Ülejäänud vesi jooksis mööda katsestendi basseini põhjas paiknevasse trappi või aurustus.

Seisvas õhus tehtud katsete korral jõudis esimese vooluhulga korral kastidesse keskmiselt 584 grammi vett ning teise vooluhulga korral 407 grammi vett. Ventilaatori esimese kiirusega katsete korral jõudis esimese vooluhulga korral kastidesse ligikaudu 648 grammi vett ning teise vooluhulga korral 392 grammi vett. Ventilaatori teise kiirusega katsete korral jõudis esimese vooluhulga korral kastidesse keskmiselt 618 grammi vett ning teise

vooluhulga korral 374 grammi vett. Ventilaatori kolmanda kiiruse korral jõudis esimese vooluhulga korral kastidesse keskmiselt 581 grammi vett ja teise vooluhulga korral 351 grammi vett.

4.4.4 Katsed tolmu, tuule ja veega

Kõige viimasena sooritati katsed tolmu, vee ja tuulega. Need katsed teostati ventilaatori kolme erineva kiirusega ja kahe erineva vooluhulgaga. Tolmu, vee ja tuule katseid sooritati kokku 30 tükki. Nende katsete tulemused on nähtavad joonistel 26, 27 ja 28.

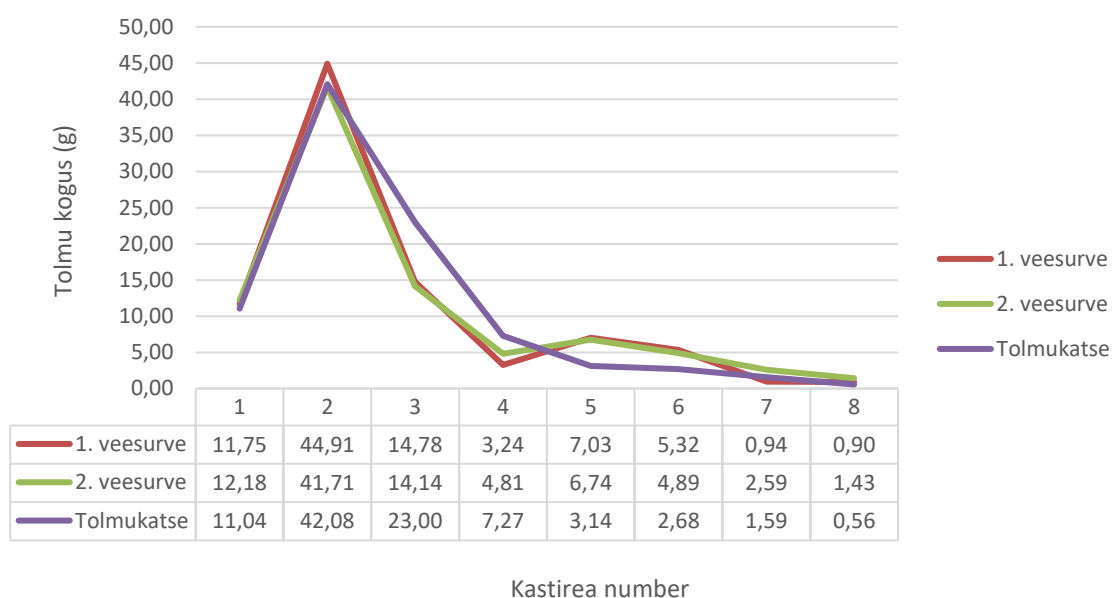


Joonis 26. Esimese tuule kiirusega tolmu-tuule-vee katsete keskmiste tolmu koguste võrdlus esimese tuulekiiruse tolmu katse keskmise tulemusega

Tolmu, tuule ja veekatsetel oli veekulu esimese vooluhulgaga umbes 3,9 liitrit. Teise vooluhulgaga oli veekulu umbes 2,3 liitrit. Joonisel 26 on märgitud iga kastirea tolmu koguste keskmine summa. On näha, et ventilaatori esimese kiiruse korral on tolmu katse tulemus tolmu-tuule-vee katse tulemusega üsnagi sarnane. Muutused on toimunud peamiselt kolmandas kastireas, kus tolmu katsete korral kogunes tolmu keskmiselt 17,13 g, kuid tolmu-tuule-vee esimese vooluhulgaga katsete korral keskmiselt 10,14 g ning teise vooluhulga korral keskmiselt 6,2 g tolmu. Samas on jooniselt 26 märgata, et tolmu katsete tulemustega võrreldes on ventilaatori esimese kiirusega tolmu-tuule-vee katsete viimaste kastiridade tulemuses tolmu kogus enamjaolt tõusnud. See tuleneb sellest, et tuul on düüside juures suunatud pigem ülesse ja üleval nii-öelda lae all on düüsidega tekitatud udusein väga

puudulik või täielikult puudu, sest düüsid pihustavad ülevalt alla ja on 63 kraadise pihustusnurgaga. Kahe kõrvuti asetseva lehvikdüüsi pihustatud uduvihmast lehvikud puutuvad üksteisega kokku düüside asukohast 32 cm allpool, mistõttu jääb kahe düüsi vahele umbes 60 cm² suurune ala, kus uduseina pole.

Ventilaatori esimese kiirusega tolmu katsetega jõudis esimesse kahte kastiritta 64,54 g tolmu ehk 69% kogu tolmust. Düüsidest edasi (kastiridadesse kolm kuni kaheksa) jõudis ventilaatori esimese kiirusega tolmu katsetel tolmu 28,70 grammi ning ventilaatori esimese kiirusega tolmu-tuule-vee katsetel 20,02 grammi (vt. joonis 18). Võib öelda, et udusein surus maha 30,3% tolmu. Teise vooluhulgaga tekitatud udusein surus maha 30,7% tolmu.

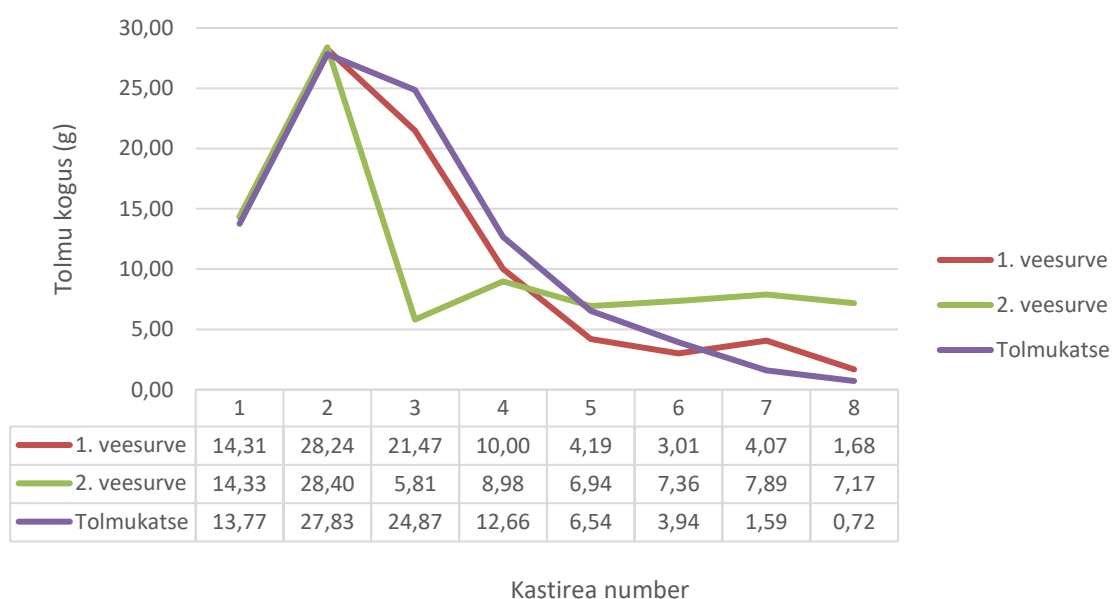


Joonis 27. 2. ventilaatori astme tolmu-vee-tuule katsete keskmiste tulemuste võrdlus 2. tuulekiiruse tolmu katsete keskmiste tulemustega

Jooniselt 27 on näha, et ventilaatori teise kiiruse korral on tolmu katsete tulemus tolmu-tuule-vee katsete tulemustega vähem sarnane kui tolmu-tuule-vee ventilaatori esimese kiirusega katsete korral. Sel korral on märgata, et suuremad muutused on toimunud teisest kuuenda kastireani. Selgelt on eristatav see, et tolmu-tuule-vee katsete tolmu kogused teises ja kolmandas kastireas on keskmiselt väiksemad kui tolmu katsete tulemus ventilaatori teise kiiruse korral. Näiteks kolmandas kastireas kogunes tolmu katsetel umbes 15 grammi tolmu, kuid tolmu-tuule-vee katsete korral kogunes mõlema vooluhulga korral kolmandasse kastiritta kõigest natukene alla 15 grammi tolmu.

Järgmine muutus on toimunud viiendas ja kuuendas kastiridades, kus on toimunud vastupidine reaktsioon. Kui kolmandas kastireas oli tolmu katsete käigus kogutud tolmu kogus tolmu-tuule-vee katse omast märgatavalt suurem, siis viiendas ja kuuendas kastiridades on hoopiski tolmu-tuule-vee katsete tolmu kogus poole suurem kui tolmu katsetel kogutud tolmu kogus. Seetõttu võib eeldada, et düüsidest lähtuv veeudu paneb omakorda õhu liikuma ning tolmu kandev õhuvool ja vett kandev õhuvool ristuvad. Tolmu-tuule-vee katsete tulemustest selgus, et ventilaatori teise kiiruse korral liigub rohkem tolmu ülevalt düüside juurest viiendasse ja kuuendasse katsealuste ritta, seetõttu võtab udusein õhust tolmu ja surub seda allapoole.

Ventilaatori teise kiirusega tolmu katsetega jõudis esimesse kahte kasti 53,12 g tolmu ehk umbes 53% kogu tolmust. Düüsidest edasi (kastiridadesse kolm kuni kaheksa) jõudis ventilaatori teise kiirusega tolmu katsetel 38,25 grammi ning ventilaatori teise kiirusega tolmu-tuule-vee katsetel 32,21 grammi tolmu. Võib öelda, et udusein surus maha umbes 15% tolmu. Teise vooluhulgaga surus udusein maha umbes 10% tolmu.



Joonis 28. Ventilaatori kolmanda tuulekiirusega tolmu-vee-tuule katsete keskmiste tulemuste võrdlus ventilaatori kolmanda tuulekiiruse tolmu katsete keskmise tulemusega

Ka jooniselt 28 on näha, et see tolmu kogus, mis kolmandas ja neljandas kastirivis vooluhulga abil väiksemaks muutus, on sadenenud hoopiski kuuendasse, seitsmendasse ja kaheksandasse kastiritta. Seetõttu võib taaskord järeldada, et veeuduga tekkiv õhuvool liigub ventilaatoriga tekitatud õhuvooluga risti ning seetõttu suunab ventilaatori õhuvool tolmu

uduseina ülevalt, kus uduseina pole või on puudulik, düüsidest mööda ning tolmu ladestub kastirivides neli kuni kaheksa. Ventilaatori teise kiirusega katsete tulemustest oli seda seost näha vähem kui ventilaatori kolmanda kiirusega katsetel.

Ventilaatori kolmanda kiirusega tolmu katsetega jõudis esimesse kahte kasti 41,59 g tolmu ehk umbes 41% kogu tolmust. Düüsidest edasi (kastiridadesse kolm kuni kaheksa) jõudis ventilaatori kolmanda kiirusega tolmu katsetel 50,30 grammi ning ventilaatori kolmanda kiirusega tolmu-tuule-vee katsetel 44,42 grammi tolmu. Võib öelda, et udusein surus maha umbes 11% tolmu. Teise vooluhulgaga surus udusein maha umbes 12% tolmu.

4.5 Järeldused katsest

Magistritöö hüpotees oli, et uduvihmutuse abil on võimalik õhust tolmu maha suruda. Laboratoorsete katsete käigus selgus, et sellistes katsetingimustes määratud hüpotees vastab tõele ja leidis kinnitust. Katsetes võrreldi kahte olukorda: ühte olukorda, kus tolmu lendleb katsestendis ventilaatori poolt tekitatud tuule mõjul ja sadeneb kuivana (düüsid ei tööta), ning teist olukorda, kus veesüsteem töötab ning tolmu surutakse maha düüside abil tekitatud uduvihma abil.

Katsete tulemustest selgus, et enamustel juhtudel kui uduvihmutus töötab, siis enne düüsirida langeb tolmu maha rohkem kui kuiva tolmu sadenemisega juhtus. See on enamjaolt tingitud uduseina lisanduvast õhusurvest ning udu mõjust, mis muudab tolmuosakesed raskemaks. Peale düüse langeb tolmu maha vähem, sest uduvihmutus püüdis osa tolmust kinni ning tolmu kogunes ka märgadele katsestendi seinadele. Vahetult enne ja pärast düüse on märgata tolmu koguse sadenemist düüsidest edasi minnes järjest vähem. Seetõttu võib väita, et düüside rivi süsteem täitis eesmärgi. Kui enne uduseina ladestunud mõõdetud tolmu koguses muutust väga näha ei olnud ja tolmu sadenes tolmu katsetega võrreldes ainult paar grammi rohkem, siis katsestendi kesk- ja lõpuosas oli ladestunud tolmu koguse muutus näha paremini: teisel pool uduvihmutust vähenes sadenenud tolmu kogus kogumiskastides märgatavalt, kuid seejärel katsestendi lõpuosas sadenes katsestendi kogumiskastidesse umbes sama kogus tolmu, mille võrra peale düüse vähem sadestus. See võib olla tingitud õhuvoolu liikumisest katusekambri lae alt, üle düüsidega tekitatud uduseina.

Küll aga läks tolmu-tuule-vee katsete käigus kaduma keskmiselt umbes viis grammi tolmu, millest osa kinnitus katsestendi niisketele ja märgadele aladele. Tolmukatsetes, kus uduseina ei tekitatud, läks kaduma keskmiselt 1,4 grammi tolmu, kuid ka seda saab hetkel liigitada selle alla, et uduseina tekitamine tõkestas tolmu levikut.

Katsetest selgus ootuspäraselt, et mida suurem on tolmu õhu liikumise kiirus, seda kaugemale kanduvad vee ja tolmu osakesed katsestendis. Vee aurumist kui sellist katsete käigus määrata ei saanud, sest katsealustest nii-öelda puudu olev vee kogus võis olla katsestendi seintel, laes ja katsealuste all.

Selgus, et kõige paremini võtab uduvihmutus õhust tolmu maha juhul, kui ventilaator töötab esimese kiirusega, st tolmu õhk liigub aeglaselt. Sel juhul püüti teise vooluhulgaga 30,7% tolmu. Tolmu-tuule-vee katsetel jõudis tolmu düüsist edasi 20,02 grammi, mis näitab, et udusein võttis ventilaatori esimese kiirusega ning esimese vooluhulgaga õhust maha umbes 30,2% tolmu. Kuna teine vooluhulk on väiksema veekuluga (0,011 l/s), siis leian, et tehtud katsete põhjal osutub kõige otstarbekamaks olukord, kus tolmu püütakse õhust kinni võimalikult väikse tuule kiirusega ja väikse vooluhulgaga.

Kuna Faschingleitner ja Höflinger olid varasemalt käsitlenud teemat juba uurinud, siis käesolevas magistritöös valiti teist tüüpi düüsid, teistsugune tolmu ja teised katseolud. Kui nemad olid katsetes uurinud, kui palju võtavad õõnes-koonusdüüsid õhust tolmu maha, siis selles töös kasutati lehvikdüüse, et vett ei pihustataks liialt laiali vaid tekiks nii-öelda udusein. Nemad kasutasid spetsiaalset tolmu, mida kasutatakse näiteks erinevate filtrite testimiseks, kuid käesolevas magistritöös keskenduti ainult puidutolmu leviku tõkestamise uurimisele. Ühtlasi olid ka katseolud teised, sest ehitatud katsestend oli küll mõõtmiselt sama suur, kuid kasutati teisi viise, kuidas annustada tolmu ning tekitada õhu liikumist katsestendis. Sellest lähtuvalt saadi käesoleva magistritöö katsete tulemustest teada, kui palju suudab kolme NF-01 düüsiga tekitatud udusein tolmu maha suruda.

Antud katsete juures tuleks järgmisel korral paremate tulemuste huvides parendada kahte metoodilist aspekti:

- Algusest peale oli mõõtealustena pappkastide kasutamine üks märkimisväärtetest ohtudest. Katsealustena kasutati kiletatud ja niiskuskindla kleeplindiga teibitud pappkaste, kuid kuna tegemist oli siiski veekatsetega, siis vettisid mõned kastid päris kiiresti läbi või muutisid enda kuju ning muutusid seejärel tehtavate katsete jaoks mittesobivaks. Seejärel tuli mõningad kastid uute vastu välja vahetada. Kõigi katsete peale kokku tuli välja vahetada umbes 20 kasti. Seda poleks juhtunud, kui oleks kasutanud plastikust kaste. Antud katses välistati plastkastid hinna tõttu. Enamus leitud plastkarpidest olid ebasobivate mõõtmetega või ümarate nurkadega ning vee ja tolmu kaod oleksid katsetes suuremaks muutunud.
- Uuringus sõelus töö autor igale katsele 100 g tolmu käsitsi ning see võis tekitada mõõtevigasid, sest käsi ei ole iga sõelumise ajal õiges asendis, sama kaugel katsestendis või ei raputa kogu aeg ühtlases tempos. Katsestendi ehitamise käigus üritati küll tekitada näiteks Venturi efekti, kuid asjatult. Tehtud katsestendis see tööle ei hakanud. Ühtlasi tuli sõelumiseks tehtud katsestendi august ventilaatori kohalt välja päris palju tolmu, mis läks samuti kadude alla. Katsed oleks olnud täpsemad, kui katsestend oleks veelgi õhukindlam.

Küll aga saab antud katsetulemusi kindlasti võtta aluseks järgnevateks uurimistöödeks. Neis peaks lisaks käesolevas magistritöös uuritud puidutolmu leviku tõkestamisele käsitlema ka teist tüüpi tolmu leviku tõkestamist, kuna puidutolm on vaid üks osa jäätmekäitluses tekkivast tolmust.

KOKKUVÕTE

Tolmuks nimetatakse õhus lendlevaid või pinnale langenud osakesi, mille läbimõõt on 10 kuni 50 mikromeetrit. Tolmu tekib paljudes tööstusharudes, näiteks paberi- ja puidutööstuses. Inimeste tarbimisharjumuste muutuste ja elanikkonna kasvu tõttu suureneb aasta-aastalt inimeste poolt tekitatud jäätmemaht üle maailma, mistõttu näeb Eesti jäätmekava 2014–2020 ette suuremat osakaalu jäätmete taaskasutamisel. Jäätmete taaskasutamisel tuleb jäätmed esmalt sorteerida, purustada, hakkida või muul viisil töödelda, mille kõigega võib kaasneda suurtes kogustes tolmu. Seetõttu on jäätmekäitlusettevõtetes väga oluline teada konkreetse tolmu iseloomu, selle mõjusid keskkonnale ja tervisele ning võimalikke tolmutõrjemeetodeid. Tolmutõrjumismeetodeid on erinevaid, nt. ventilatsioon, tolmutekitava seadme eraldamine töökeskkonnast, jäätmete teisaldamine torusüsteemi, aga ka vihmutusseadmed.

Käesolevas magistritöö peamine eesmärk oli katsetada uduvihmutuse efektiivsust puidutolmu leviku tõkestamisel siseruumides. Selleks anti esmalt kirjanduse baasil ülevaade õhus lendlevast tolmust, selle mõjust inimestele ja seadmetele ning taaskasutamise juures tekkinud tolmu levikut tõkestavatest meetoditest. Praktilise tööna ehitati EMÜ veemajanduse osakonda katsestend ning viidi läbi tolmutõrje katsed uduvihmutusega, mille abil loodeti leida soovitusi jäätmekäitlusjaamadele ja puidutööstustele.

Kirjanduse ülevaate tulemusel selgus, et tolmu leviku tõkestamine tootmisruumides on väga aktuaalne ja vajalik teema. Nimelt inimestel, kes töötavad iga päev seadmete juures, mis tekitavad väga palju tolmu, võib tolmu kogus õhus mõjutada tervist suisa niipalju, et asi lõppeb haiglaravi või püsiva tervisekahjustusega. Peale inimeste mõjutab õhusaaste ka materjale ja seadmeid ning tolmu suur kogus õhus on lausa plahvatusohtlik.

Tolmutõrje katsetes uduvihmutitega kasutati puidu lihvimisel tekkinud tolmu, mille keskmine suurus oli 29 mikromeetrit ning mis on üks tüüp jäätmete taaskasutamisel tekkivast tolmust. Võrreldi kahte olukorda: ühte olukorda, kus tolmu lendleb katsestendis ventilaatori poolt tekitatud tuule mõjul ja düüside rivi ei tööta, ning teist olukorda, kus

düüside rivi töötab. Selleks ehitati katsestend mõõtmetes 3 m x 1,5 m x 1,5 m ning stendi sisse tekitati kolme NF-01 lehvikdüüsi abil udusein. Tolmu hõljuma panemiseks paigaldati katsestendi ühte otsa ventilaator. Ventilaatori kohale tehti ava ning sealt annustati katsetes tolmu. Täpselt sellist süsteemi autori teada Eestis seni rakendatud ei ole, mis lisab metoodikale väärtust selle uudsuse osas.

Magistritöö aluseks võeti hüpotees, et uduvihmutusseadmega on võimalik tolmu levikut tõkestada või maha suruda. Hüpotees leidis katsete näol kinnitust, kuna tulemustest selgus, et uduvihmutusseadmega tekitatud udusein aitab takistada puidutolmu levikut. Selgus, et kõige paremini võtab uduvihmutus õhust tolmu maha juhul, kui ventilaator töötab esimese kiirusega, st tolmine õhk liigub aeglaselt. Sel juhul püüti teise vooluhulgaga 30,7% tolmu. Tolmu-tuule-vee katsetel jõudis tolmu düüsidest edasi 20,02 grammi, mis näitab, et udusein võttis ventilaatori esimese kiirusega ning esimese vooluhulgaga õhust maha umbes 30,2% tolmu. Kuna teine vooluhulk on väiksema vooluhulgaga (0,011 l/s), siis leian, et tehtud katsete põhjal osutus kõige otstarbekamaks olukord, kus tolmu püütakse õhust kinni võimalikult väikse tuule kiirusega ja väikse vooluhulgaga. Samuti selgus, et tolmu ja vee osakeste suurused peavad olema enam-vähem sama suured, et veeosakesed tolmuosakesed kinni püüaks.

Antud magistritöö täitis oma eesmärgid ning saadud tulemuste põhjal saab uduvihmaga tolmu levikut tõkestavaid seadmeid soovitada Eesti jäätmekäitlusjaamadesse, puidutööstusesse ja mujale, kus tolmuuga probleeme on ja tolmu tavaliste ventilatsiooniseadmetega ära imeda ei saa. Samuti on antud töös läbi viidud katsed ja tulemused abiks järgmistele tolmu leviku tõkestamisele keskenduvatele uurimustele, kuna antud töös kasutatavat uutset metoodikat saab õigesti kohandades ning katsete jooksul selgunud murekohtade lahendamise järel rakendada ka teistele tolmulüükidele. Nimelt jäätmekäitluses tekib palju eri tüüpe tolmusid aasta-aastalt üha enam ning vajadus nende tõrjumise meetodite efektiivsuse uuringute järele kasvab.

VIIDATUD ALLIKAD

1. Air Spectrum: Odour Control Systems koduleht. <http://www.airspectrum.com/contact-us/> (Külastatud: 24.03.2017).
2. **Angelstok, F.** Ventilatsiooni alused. Tallinn: Sisekaitseakadeemia. 64 lk. http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/17329/Ventilatsiooni_alused.pdf (10.02.2017)
3. Balti-Filtrid OÜ koduleht. www.baltifiltrid.ee (Külastatud: 10.02.2017)
4. Burkert koduleht. <https://www.burkert.com/en> (Külastatud: 19.05.2019)
5. Business Dictionary koduleht <http://www.businessdictionary.com/definition/dust.html> (Külastatud: 27.02.2017)
6. Christiana, A. (2012) All about dust collection – learn how to protect your lungs with top-notch dust collection tips and techniques. On-line artikkel. (<http://www.finewoodworking.com/2012/12/17/all-about-dust-collection>) (Külastatud: 17.05.2017)
7. Dust Boss koduleht. <http://www.dustboss.com/products/db-r/> (Külastatud: 10.03.2017)
8. **Eckhoff, R, K.** (2003). Dust Explosions in the Process Industries: third edition. Gulf Professional Publishing. 554 lk.
9. Eesti paiksetest ja liikuvatest saasteallikatest välisõhku eralduvate saasteainete summaarse teheitkoguste vähendamise riiklik programm aastateks 2006-2015. Environment Directorate-General of the European Commission. 42 lk.
10. Eesti standard EVS-EN 60079-10-2:2015 Plahvatusohtlikud keskkonnad. Osa 10-2: Piirkondade liigitus, plahvatusohtlikud tolmkeskkonnad. 8 lk.
11. Civitta Eesti AS. (2015) Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüs. Keskkonnaministeerium. Civitta Eesti AS. 75 lk.
12. **Eisen, M.** (2003) Puidutolmus peituvad paljud tervisehädad. Artikkel ajalehes Äripäev (avaldatud 12.02.2003) (<http://www.aripaev.ee/uudised/2003/02/11/puidutolmus-peituvad-paljud-tervisehädad>)
13. Euroopa liidu Ringmajanduse pakett. (2015). Tallinn: Keskkonnaministeerium. 42 lk.
14. **Faschingleitner, J., Höflinger, W.** (2010). Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling. Vienna University of Technology, Institute of Chemical Engineering.
15. **Gorka-Kostrubiec, B., Jelenska, M., Krol, E.** (2014) Magnetic signature of indoor air pollution: household dust study. Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw.

16. Pärnu linna jäätmehoolduseeskiri. (vastu võetud 20.06.2013, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 30.06.2013). – *RT IV*, 24.04.2015, 7
17. Jäätmeseadus. (vastu võetud 28.01.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.01.2017). – *RT I*, 14.06.2013, 6
18. **Kaasik, M., Kallaste, T., Kimmel, V., Maasikmets, M., Manfred Noe, S., Orru, H., Roots, O., Tamm, E., Teinemaa, E.** (2015). Õhusaaste käsiraamat. Tallinn: Tallinna raamatutrukikoda. 102 lk.
19. **Keis, K.** (2010). Lokaalse ja regionaalse saaste eristamise võimalused Lahemaal. (Magistritöö). Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskond. Tartu.
20. **Leevik, M., Liiver, M., Kuusik, C., Päären, R., Rattur, A.** (2012) Eesti jäätmekäitluse ülevaade 2008-2010. Tallinn: Keskkonnateabe Keskus. 69 lk.
21. **Maasikmets, M., Saare, K., Arumäe, T., Lehes, L., Viidik, A., Ebber, A.** (2013) Linnade välisõhu kvaliteedi kompleksse hindamise analüüs. Tallinn. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ. Uuringu aruanne. 234 lk.
22. **Naumoff, K.** (2005) Indoor Air Pollution measurement options presentation in Center for Entrepreneurship in International Health & Development UC Berkeley. 41 lk.
23. **Masing, V.** (1992). Ökoloogialeksikon. Tallinn: Tallinna raamatutrukikoda. 320 lk.
24. **Mercer, J. H.** (1978). West Anatarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster. Institute of Polar Studies, The Ohio State University.
25. **Olup, N-M.** (2017) Suur-Sõjamäe jäätmejaamas puhkes tulekahju. Artikkel ajalehes Postimees (avaldatud 09.05.2017) (<http://tallinncity.postimees.ee/4106773/suur-sojamae-jaatmejaamas-puhkes-tulekahju>).
26. **Orru, H., Merisalu, E.** (2007). Õhusaaste linnades ja selle mõju inimeste tervisele. Eesti Arst. 2007. Nr.86 (6). 5lk.
27. **Orru, H.** (2007). Välisõhu kvaliteedi mõju inimeste tervisele Tallinna linnas (peentest osakestest tuleneva mõju hindamine). Uuringu aruanne. 61 lk.
28. **Orru, H.** (2008). Välisõhu kvaliteedi mõju inimeste tervisele Tallinna, Tartu, Pärnu, Kohtla-Järve ja Narva linnades. Uuringu aruanne. 67 lk.
29. **Orru, H., Teinemaa, E., Lai, T., Merisalu, E., Tamm, T., Kaasik, M., Kimmel, V., Orru, K., Forsberg, B.** (2010) Peened osakesed välisõhus ja neist tuleneva tervisemõju hindamine Tallinnas, Tartus, Kohtla-Järvel, Narvas ja Pärnus. – Eesti Arst. 2010. Nr.89 (4). 9lk.
30. Pakendiseadus. (vastu võetud 21.04.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.06.2004). – *RT I*, 04.04.2012, 6
31. **Parts, E.** (2013) Tolmusaaste. (Bakalaureusetöö). Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskond. Tartu.

32. Piire ületav õhusaaste. (2004). /Koost. M. Maasikmets; J. Valge. Tallinn: Keskkonnaministeerium. 128 lk.
33. Projecta Balti AS koduleht. <http://www.projecta.ee> (Külastatud: 10.05.2017)
34. **Randmaa, T.** Puidutolmu plahvatus või siiski ainult tulekahju. Toomas Randmaa OÜ (online) <http://www.tuleohutusekspert.ee/www/index.php/ee/2011-08-27-08-40-42/artiklid/7-estonian/17-artikkel-2013-02-20> (Külastatud: 30.02.2017)
35. Riigi Jäätmekava 2014-2020. Keskkonnaministeerium. Vastu võetud 2014. aastal. <http://www.envir.ee/et/riigi-jaatmekava-2014-2020>
36. **Spielberg, K.** (2015). Jäätmemajanduse ja jäätmekorralduse arengust Eestis ning selle võrdlus Rootsiaga. (Bakalaureusetöö). Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskond. Tartu.
37. **Tamm, V.** (2000). Niisutus. Tartu: Eesti Põllumajandusülikool. 97 lk.
38. Volcano discovery. <https://www.volcanodiscovery.com/photos/volcanoes.html> (Külastatud: 26.03.2017)
39. Välisõhu saastatuse taseme piir-, sihtväärtused ja saastetaluvuse piirmäärad, saasteainete sisalduse häiretasemed ja kaugemad eesmärgid ning saasteainete sisaldusest teavitamise tase. (vastu võetud 07.09.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 15.07.2011). – *RT*
40. Waste statistics. Euroopa statistikaamet „Statistics Explained“ koduleht . Andmed seisuga 2016. (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics) (Külastatud: 12.03.2017)

WOODEN DUST SUPPRESSION BY MIST IRRIGATION

SUMMARY

The dust is defined as particles floating in the air or lying on the surface that have the diameter of 10 to 50 microns. The dust is generated in many industries, such as paper and wood industries. The overall amount of the wastes produced by the humans is increasing every year because of the increase of the human population and the consumer habits, which is why Estonian national waste management plan for 2014-2020 intends to increase the role of recycling. In order to recycle, the waste must first be sorted, crushed, shredded or otherwise processed which may cause dust. Therefore, it is very important in waste management industries to know the characteristics of the dust, its impacts on the health and environment and also potential suppression methods of the dust.

The main aim of this Master's Thesis was to test the effectiveness of the nozzle line system in wood dust suppression. For that, firstly the literature-based overview of air pollution, flying dust particles, their effects on humans/technological gear and also dust suppression equipment was given. As a practical part, the test stand was built and dust suppression experiments with nozzle line system conducted in a hope to give some suggestions to the waste management companies and wood industries.

As a result of the literature-based overview, it is clear that dust suppression in industrial premises is an actual and important topic. More precisely, the gear that generates a lot of dust might have huge impact on the health of the people working near them, sometimes ending up with hospital treatments or permanent health problems. Besides people, the air pollution also affects the materials and gear, and the high amounts of dust might even have explosive characteristics.

The experiments were carried out using the dust with the average particle size of 29 microns originating from wood sanding activities, representing one dust type of the many generated in waste recycling. Two situations were compared: one in which the dust is flying in the test stand with the help of the wind generated by the fan and the nozzle line system is not

working, and the other, where the nozzle line system is working. For experiments a test stand with the measures of 3x1,5x1,5 meters was built and the mist wall was generated by three NF-01 nozzles. To make the dust particles fly, the fan was placed on the one end of the test stand. An opening above it was left through which the dust was dosaged.

The hypothesis of this thesis was that it is possible to prevent dust circulation or suppress the dust with nozzle line system. The hypothesis was supported by our test results because the mist wall helped to suppress the dust. Also, it came out that dust and water particles have to be more or less the same size to be able to catch the dust particles.

The aims of this Master's thesis were fulfilled and based on the results it is possible to recommend the mist suppression equipment for dust suppression to Estonian waste management companies, wood industries and other places where the dust is a problem and it cannot be removed with usual ventilation methods. Also, the conducted experiments and results are useful for the next studies concentrating on the dust suppression, because the material and methods used here is new in Estonia and can be used on other types of the dust after necessary alterations and solving some methodological issues that came out during our study. Namely, the different types of dust is being generated more and more every year in waste management and the need for the studies about dust suppression effectivity is increasing, too.

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Liina Taits,

(sünnipäev pp/kuu/aa 09/05/1993)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Puidutolmu leviku tõkestamine uduvihmutuse abil,

mille juhendaja on Mait Kriipsalu,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 22.05.2017

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)